

Axialprofilrohrwalzen von Getrieberingen

Dr.-Ing. Thomas Ficker*, Dr.-Ing. André Hardtmann[†]

Technische Universität Dresden

*Institut für Formgebende Fertigungstechnik, [†]Institut für Festkörpermechanik

Zur Ausschöpfung des enormen Potenzials von Kaltwalzverfahren zur Herstellung von ring- und rohrförmigen Werkstücken ist eine zielgerichtete Erweiterung der Anwendungsgrenzen unter Nutzung von wissenschaftlicher Verfahrensdurchdringung inkl. Modellbildung und Simulation des Walzprozesses notwendig. Dieser Aufgabe wurde sich beim Axialprofilrohrwalzen gestellt.

Ausgangslage

Die Forderung nach Entwicklung und Anwendung material-, energie- und arbeitszeit-sparender - insgesamt kostengünstiger - Fertigungsverfahren steht auch in der Wälzlager- und Automobilindustrie bei der Herstellung profilierter ring- und rohrförmiger Werkstücke wie z. B. Wälzlager- und Getrieberingen.

Prädestiniert für die Erfüllung dieser Forderung sind insbesondere Walzverfahren wie die in den 1980-er und 1990-er Jahren unter wesentlicher Mitwirkung der TU Dresden entwickelten Kaltwalzverfahren Tangentialprofilringwalzen (TPRW) und Axialprofilrohrwalzen/Walzeinstecken (APRW/WE), wobei die genannten Verfahren speziell unter dem Gesichtspunkt einer endkonturnahen Fertigung (Near Net Shape Forming) entwickelt wurden.

Während das TPRW inkl. der zugehörigen Ringwalzautomaten zwischenzeitlich in der Industrie breite Anwendung gefunden hat, befindet sich das APRW/WE inkl. der zugehörigen maschinentechnischen Umsetzung zur Realisierung einer Verfahrenskombination APRW/WE - Drehen derzeit in der Entwicklungs- bzw. Überführungsphase in die Produktion.

Speziell die Tatsache, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt weder für das TPRW noch für das APRW/WE eine umfassende Verfahrensdurchdringung inkl. Modellbildung zum Walzprozess vorliegt - was auch im Zusammenhang mit der relativ jungen Entwicklungsgeschichte dieser Kaltringwalzverfahren im Vergleich zu traditionellen Fertigungsverfahren wie Drehen, Schleifen oder Warmringwalzen, Fließpressen zu sehen ist - macht die (weitere) zügige Einführung dieser Walzverfahren in die industrielle Praxis zeit- und kostenintensiver als wirtschaftlich vertretbar. Das äußert sich u. a. darin, dass bei der Einführung neuer - bisher noch nicht gewalzter - Ringtypen bzw. Ringgeometrien weitgehend empirisch vorgegangen werden muss. Das betrifft sowohl die Ermittlung von Anfangsring- bzw. Anfangsrohrabmessungen und Walzwerkzeugabmessungen als auch die Festlegung geeigneter bzw. optimierter Walzparameter. Dabei steigt mit zunehmendem Kompliziertheitsgrad der Ringgeometrie der erforderliche Aufwand (u. a. für notwendige Vorversuche) zwangsläufig sprunghaft an.

Dieser Aufgabe - Verfahrensdurchdringung inkl. Modellbildung des Walzprozesses beim Kaltringwalzen - wurde sich im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens gestellt.

Zielsetzung, durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse der ersten Phase des Vorhabens sind in [FIC07] und [ULB07] ausführlich beschrieben. Nachfolgend wird sich auf die Beschreibung vorgenannter Punkte der zweiten Vorhabensphase konzentriert.

APRW/WE von Getrieberringen

Nachdem in bisherigen Arbeiten [FIC95, FIC07] der Nachweis des APRW/WE von symmetrischen Wälzlageringen (Kugellagerinnenring) und asymmetrischen Wälzlagerinnenringen (Kegel- und Zylinderrollenlagerinnenring) entsprechend den von der Wälzlagerindustrie gestellten Qualitätsanforderungen erbracht wurde, ist unter dem Gesichtspunkt der Erweiterung der Anwendungsgrenzen des APRW/WE Zielstellung, diesen Nachweis für das APRW/WE der Außenkontur von (komplizierten) Getrieberringen entsprechend der in der Automobilindustrie gängigen Qualitätsanforderungen - bei gleichzeitiger Erfassung der für die Simulation des Walzprozesses erforderlichen Eingangsgrößen - zu erbringen, zumal hier das größere Potenzial für eine Anwendung in Deutschland gesehen wird als bei (einfachen) Wälzlageringen. Bisherige Versuche zum APRW/WE von Getriebekomponenten beschränkten sich auf die Testung der prinzipiellen Möglichkeit derartige Werkstücke mit diesem Walzverfahren herstellen zu können, ohne erreichbare Maß-, Form- und Lagegenauigkeiten näher zu untersuchen (Bild 1).

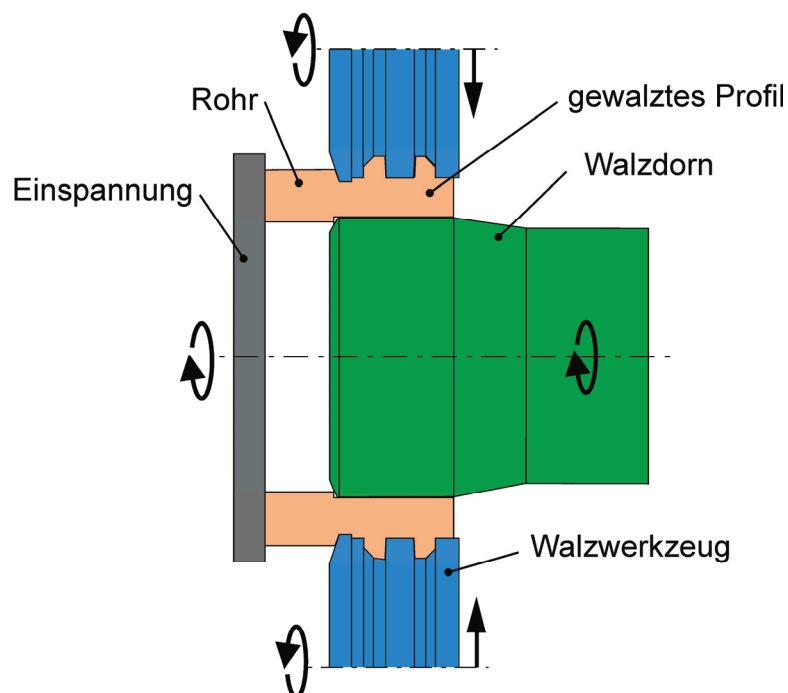


Bild 1: Verfahrensprinzip Axialprofilrohrwalzen von Getrieberringen

Bisher aufgetretene Genauigkeitsfehler an den gewalzten Ringen gehen im Wesentlichen auf Mängel der genutzten APRW/WE-Versuchseinrichtung, die auf den reinen Walzprozess beschränkt ist, zurück.

Diese Mängel sollen durch Entwicklung und Bau einer auf die Verfahrenskombination APRW/WE - Drehen zugeschnittenen leistungsfähigeren Versuchsanlage - bei möglicher Durchführung des gesamten Fertigungsablaufes der Verfahrenskombination APRW/WE - Drehen (Außen-Überdrehen/Innen-Ausdrehen, APRW/WE, ggf. Fertigdrehen der Innenkontur, Abstechdrehen) auf einer Maschine - beseitigt werden, wofür die im Rahmen der durchzuführenden Walzversuche erreichten Ergebnisse herangezogen werden.

Als Typenvertreter für die Walzversuche wurde bezüglich Abmessungen und Profil der Außenkontur ein Getriebering (Schaltmuffe) ausgewählt, der ggf. als Basis für eine spätere Produktionseinführung dienen kann.

Für die Versuchsdurchführung wurde die vorhandene - für das APRW/WE von Wälzlageringerringen konzipierte - APRW/WE-Versuchseinrichtung (Walzvorrichtung) für das APRW/WE von Getrieberingen modifiziert. Der sich beim APRW/WE von Wälzlagerkomponenten bewährte Messaufbau wurde - bei Anpassung an die konstruktiven Änderungen der Walzvorrichtung - weiter genutzt, wobei die installierte Sensorik die Online-Erfassung der Walzkräfte (radial, axial), des Drucks im hydraulischen Arbeitszylinder, der Walzmomente an der Arbeitsspindel, des Walzschlittenweges und der Walzschlittengeschwindigkeit gestattet.

In umfangreichen Vorversuchen wurden zunächst die Voraussetzungen zur Durchführung der Walzversuche zur Gewinnung von Kenngrößen für die Simulation des Walzprozesses beim APRW/WE des als Typenvertreter ausgewählten Getrieberinges geschaffen, die anschließend in mehreren entsprechenden Versuchsprogrammen (gezielte Parameterkombinationen) unter Nutzung der „Statistischen Versuchsplanung“ ermittelt wurden.

Zur Erfassung der in den Versuchsprogrammen gewonnenen Versuchsdaten wird die Technologiedatenbank Ringwalzen (RIWADAT) verwendet [FIC07]. Auf Basis dieser Technologiedaten können die Ergebnisse der Modellbildung/Simulation validiert werden.

Neben der Messung der beim APRW/WE erreichten Maß-, Form- und Lagegenauigkeiten wurden die gewalzten Getrieberinge einer metallografischen Untersuchung (Gefügeanalyse, Rissprüfung) unterzogen und für die - zu einem späteren Zeitpunkt - Weiterbearbeitung (Tauglichkeit für Nachfolgeprozesse wie z. B. Räumen zur Herstellung einer Innenverzahnung, Wärmebehandlung) vorbereitet.

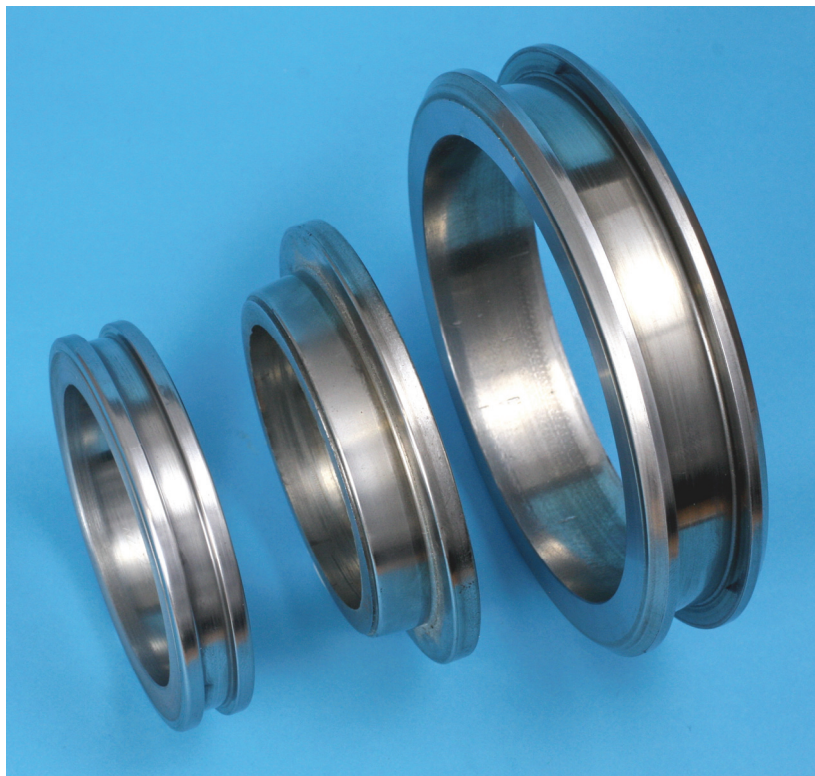


Bild 2: Mit APRW hergestellte Getrieberinge

Im Ergebnis der Geometriemessung sowie der Werkstoffuntersuchung zeigt sich, dass der Nachweis der Walzbarkeit der Außenkontur von Getrieberringen mittels APRW/WE - trotz nicht auf den Anwendungsfall zugeschnittener Walzvorrichtung - entsprechend der gestellten Qualitätsanforderungen erbracht werden konnte. Bild 2 zeigt durch APRW/WE gewalzte Getriebekomponenten mit symmetrischem und asymmetrischem Profilquerschnitt, links der gewählte Typenvertreter.

Alle Maß-, Form- und Lagegenauigkeiten der gewalzten Ringe liegen im geforderten Toleranzbereich. Die Werkstoffuntersuchung lässt makroskopisch keinerlei Auffälligkeiten an den gewalzten Werkstücken erkennen, während mikroskopisch an einigen Werkstücken Überwalzungen und Materialtrennungen erkennbar waren. Die Ursachen für die erkannten Mängel werden im verwendeten Ausgangsrohr gesehen.

Eine wichtige Erkenntnis der durchgeführten Walzversuche ist, dass beim APRW/WE für den Anwendungsfall „Getriebekomponenten“ der Einsatz einer Gegendruckeinrichtung zur Steuerung des Werkstoffflusses - in Verbindung mit dem Kompliziertheitsgrad des zu walzenden Werkstückes und der gewählten Werkzeugvariante - notwendig bzw. sinnvoll ist, um die geforderten Genauigkeiten zu gewährleisten bzw. zu verbessern.

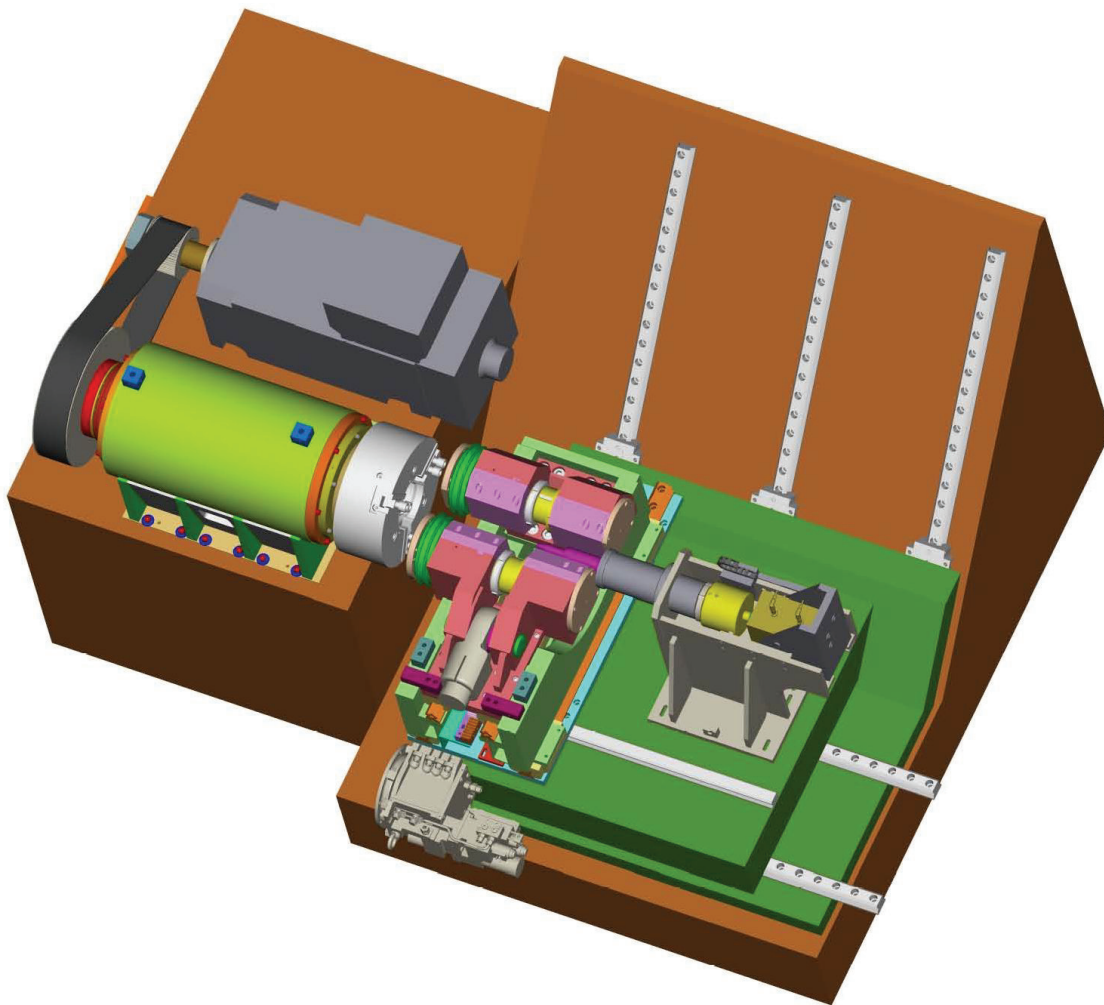


Bild 3: Versuchsanlage

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden für eine neu entwickelte - speziell auf den Anwendungsfall „Getrieberringfertigung“ zugeschnittene - Versuchsanlage inkl. steuerbarer Gegendruckeinrichtung genutzt (Bild 3).

Weiterentwicklung der Prozessmodellierung

Hinsichtlich Verfahrensdurchdringung inkl. Modellbildung des Walzprozesses ist Zielstellung die Weiterentwicklung, Erprobung und Validierung der für das APRW/WE von (symmetrischen) Kugellagerinnenringen entwickelten Berechnungsverfahren [ULB07] für das APRW/WE von Getrieberingen. Unsymmetrische Profile (wie gewalzte Kugellagerinnenringe mit Einstichnut) und insbesondere komplizierte Profilquerschnitte mit schärferen Übergängen (wie Getrieberinge) stellen höhere Anforderungen an die Simulation, da größere plastische Dehnungsgradienten im Werkstück entstehen und diese durch das Modell berechnet werden müssen.

Im Ergebnis der durchgeführten Betrachtungen wurde das vorhandene Finite-Element-Modell des Walzprozesses beim APRW(/WE) für eine breite Anwendung zur Auslegung der Werkzeuge und Prozessparameter vervollkommen. Hierzu sind vor allem die Randbedingungen und Symmetrieanahmen dem realen Walzvorgang angepasst worden. Bei der Werkstoffmodellierung konnte auf die Ergebnisse der im Rahmen des Projektes durchgeführten Fließkurvenermittlung bei hohen Umformgraden ($\varphi > 1$) zurückgegriffen werden.

Wie alle inkrementellen Umformverfahren erfordert das APRW/WE lokal an der Kontaktstelle eine sehr feine Diskretisierung, während für den Restkörper eine sehr grobe Unterteilung ausreicht. Um bei einer 3D-Modellierung des Walzprozesses die Elementanzahl zu verringern, ist die Anwendung eines verbesserten Algorithmus zur Neuvernetzung notwendig. Hierzu wurde ein vom Softwarehersteller Simufact Engineering GmbH als „Template-Ring-Methode“ bezeichnetes Remeshing-Verfahren genutzt. Damit ist während der Walzsimulationen die Erzeugung neuer FE-Netze, die an kompliziert ausgebildete Walzwerkzeugkonturen angepasst sind, mit hoher Effizienz möglich. Die Simulationsrechnung läuft stabiler und die Rechenzeit sinkt um ca. 50 %.

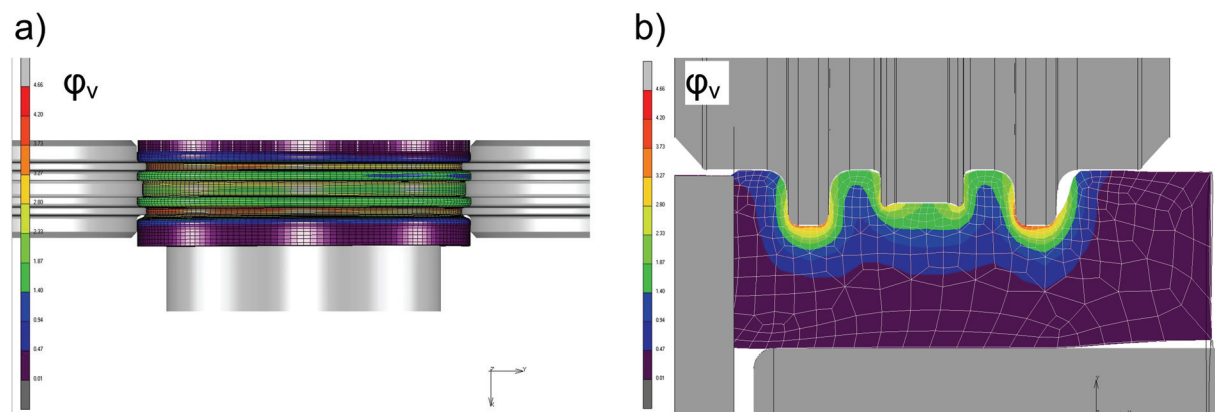


Bild 4: Simulation des Werkstoffflusses beim APRW/WE einer Schalmuffe
a) Draufsicht, b) Schnitt in XY-Ebene

Zunächst wurde die Methode am Beispiel des Walzens eines Kugellagerinnenringes mit Einstichnut erfolgreich getestet. Anschließend wurden Modelle für eine Schalmuffenkontur erstellt. Diese Modelle ermöglichen die Simulation von Walzprozessen mit relativ komplizierten Werkzeugkonturen, um das Werkstoffflussverhalten vor der Werkzeugfertigung zu prognostizieren (Bild 4). Damit konnten Walzwerkzeuge konstruiert werden, mit denen die Schalmuffen in den geforderten Maß-, Form- und Lagetoleranzen herstellbar waren.

Für ein ganzheitliches Simulationsmodell ist die Verkopplung der Teilsysteme Maschine und Prozess erforderlich. Zur Modellierung relevanter Maschineneigen-

schaften wurde die quasistatische Kopplung von FEM-Prozessmodell und Maschinenmodell gewählt. Diese Kopplungsstufe stellt die Erweiterung des FEM-Prozessmodells - im Sinne eines integrierten FEM-Modells - durch Berücksichtigung der statischen Maschineneigenschaften (als reduzierte, ersetzende Beschreibung) in direkter Rückwirkung auf die geometrischen Randbedingungen der FEM-Simulation dar [HAR10].

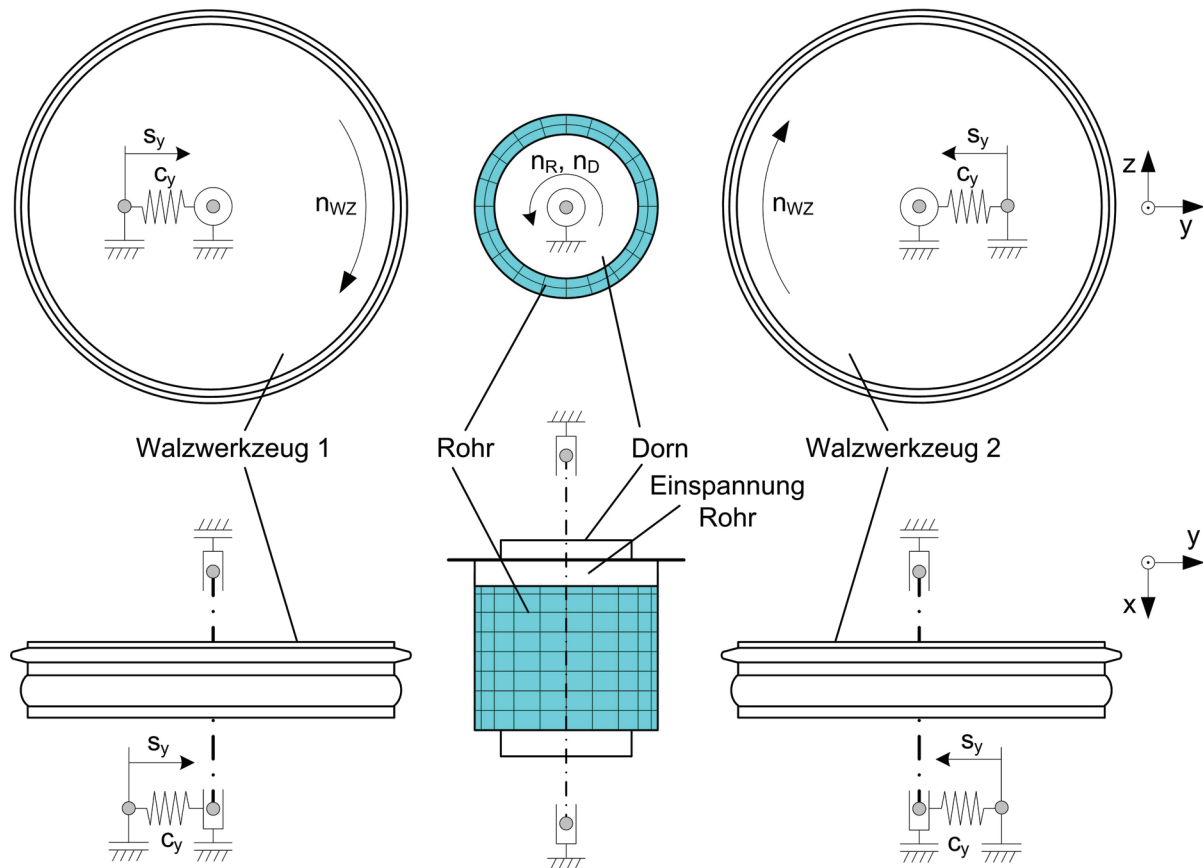


Bild 5: Erweiterte Prozessmodellierung des APRW/WE

Beispielhaft wird am Simulationsmodell für die Herstellung eines Kugellagerinnenringes (Bild 5) der Einfluss des elasto-statischen Verhaltens, d. h. der Auffederung der Walzvorrichtung, auf den Werkstofffluss gezeigt.

Vergleicht man die Simulationsergebnisse von Prozessmodellen mit und ohne Einbeziehung der Auffederung (Bild 6) erkennt man deutlich, dass unter Berücksichtigung elastischer Eigenschaften der tatsächliche Walzspalt unter Prozesslast realitätsnäher berechnet wird. Bei gleichem Walzenvorschub von 2,57 mm ist der Walzspalt noch zu groß, was in Bild 6b an der deutlich geringeren Profilausformung zu erkennen ist. D. h., der Walzprozess muss fortgesetzt werden, bis der Soll Durchmesser (Bild 6c) erreicht ist und sich somit ein notwendiger radialer Walzenvorschub von 2,97 mm ergibt.

Mit der realitätsnahen Ermittlung des für eine vollständige Profilausfüllung notwendigen Walzenvorschubs unter Berücksichtigung der Auffederung der Walzvorrichtung konnte die Modellgenauigkeit wesentlich verbessert werden.

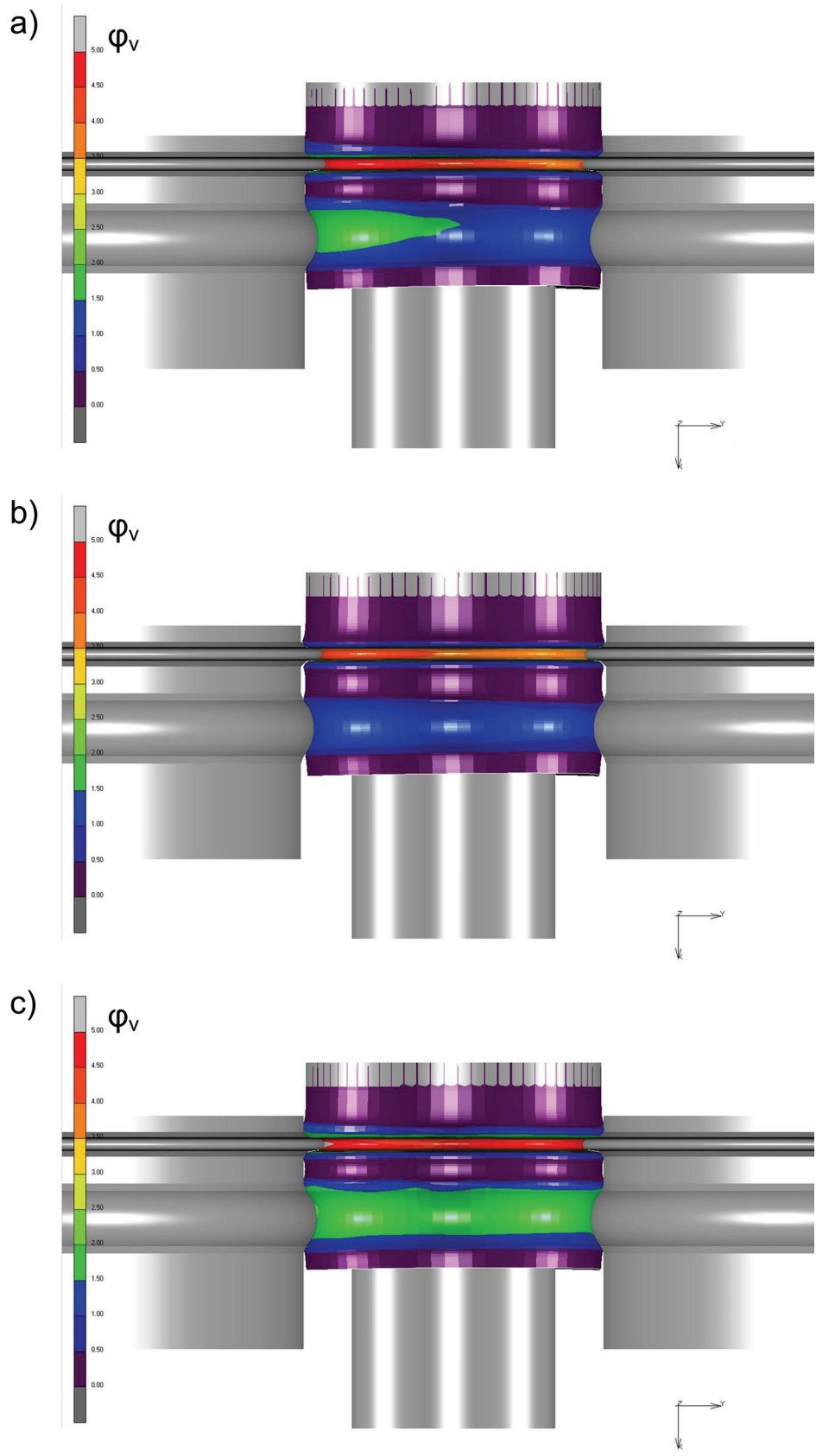


Bild 6: Simulationsergebnisse beim APRW/WE eines Kugellagerinnenringes
 a) ohne Berücksichtigung der Auffederung nach 2,57 mm Walzenvorschub
 b) mit Berücksichtigung der Auffederung nach 2,57 mm Walzenvorschub
 c) mit Berücksichtigung der Auffederung nach 2,97mm Walzenvorschub

Ausblick auf künftige Arbeiten und Beschreibung möglicher Anwendungen

Im nächsten Schritt schließt sich die Optimierungsphase der neuen Versuchsanlage an der TU Dresden an mit dem Ziel, die Voraussetzungen für Entwicklung und Bau einer Serienmaschine zur Produktionseinführung der Verfahrenskombination APRW/WE - Drehen sowohl für den Anwendungsfall „Wälzlagerringfertigung“ als auch den Anwendungsfall „Getrieberingfertigung“ - einhergehend mit einer Verfahrensweiterentwicklung - zu schaffen.

Der Einsatz der o. g. Gegendruckeinrichtung (inkl. Walzdorn) führt zu einer maßgeblichen Erweiterung der bekannten Verfahrenskombination APRW (und/oder WE) - Drehen hin zu einer völlig neuartigen Verfahrenskombination Radial-Axial-Profilrohrwalzen (und/oder WE) - Drehen. Durch Einsatz des Radial-Axial-Profilrohrwalzen (RAPRW) ergeben sich Fertigungsmöglichkeiten für ein weitaus größeres Teilespektrum sowohl im Vergleich mit dem APRW/WE als auch mit anderen bekannten Walzverfahren. Außerdem erhöht sich die Verfahrensflexibilität beträchtlich [FIC03].

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Verfahrenskombination RAPRW/WE - Drehen liegt in der Vielzahl an Kombinations- bzw. Variationsmöglichkeiten von umformenden Verfahren wie Walzen (aber auch z. B. Rundkneten) und spanenden Verfahren wie Drehen (aber auch z. B. Schleifen), was die herstellbare Teilevielfalt - auch über Getriebe- und Wälzlagerkomponenten hinausgehend - weiter erhöht. Das betrifft u. a. die Herstellung bzw. Bearbeitung von innenprofilierten (auch innenverzahnten) Werkstücken.

Voraussetzung für die wirtschaftliche Verwertung der erreichten Ergebnisse ist eine Maschinenlösung für die Realisierung der Verfahrenskombination APRW/WE-Drehen. Derzeit liegt noch keine produktionsreife Lösung vor.

Erfolgsversprechendster Weg zur maschinenseitigen Umsetzung der Verfahrenskombination APRW/WE - Drehen ist aus Sicht der TU Dresden die Entwicklung eines neuen Maschinentyps, der speziell auf die Verfahrenskombination zugeschnitten ist.

Bisherige Erfahrungen (z. B. beim ebenfalls unter maßgeblicher Mitwirkung der TU Dresden entwickelten Tangentialprofilringwalzen) haben gezeigt, dass das Vorhandensein einer auf ein (neuentwickeltes) Verfahren (und den vorgesehenen Anwendungsfall) zugeschnittenen Maschine ein wesentlicher Faktor für den industriellen Durchbruch einer neuen Verfahrenslösung ist.

Die Autoren danken der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung der vorgestellten FuE-Arbeiten.

Literatur:

- [FIC95] Ficker, Th.; Hardtmann, A.: Maschinenkonzeption zur kombinierten umformenden und spanenden Bearbeitung von rohr- und ringförmigen Werkstücken. Forschungsbericht, TU Dresden/Pittler-Tornos Leipzig Werkzeugmaschinen GmbH, 1995
- [FIC03] Ficker, Th.; Hardtmann, A.; Houska, M.: Verfahren zur Herstellung von innen- und/oder außenprofilierten Ringen sowie Anordnung hierzu. DE 10 219 441 C1, 2003
- [FIC07] Ficker, Th.; Hardtmann, A.; Houska, M.: Axialprofilrohrwalzen von Wälzlagerringen. Teil 1: Experimentelle Einflussanalyse. UTF-Science II/2007, Meisenbach Verlag
- [ULB07] Ulbricht, V.; Sparr, H.: Axialprofilrohrwalzen von Wälzlagerringen. Teil 2: Numerische Einflussanalyse. UTF-Science II/2007, Meisenbach Verlag
- [HAR10] Hardtmann, A.: Entwicklung und Bewertung eines erweiterten Blechumformprozessmodells unter besonderer Berücksichtigung der elasto-statischen Wechselwirkungen zwischen Maschine und Prozess. Dissertation, TU Dresden, 2010