

Fertigung von hohlen Getriebewellen durch Rundkneten

Müller, Frank, HMP Umformtechnik GmbH, Geschäftsführer

Kurzfassung

Das Rundkneten hat sich in der Automobilindustrie als leistungsfähiges Umformverfahren etabliert. Ausgehend von Rohr als Halbzeug werden Wellen mit verschiedensten Funktionen endkonturnah hergestellt. Dabei werden die Möglichkeiten des Verfahrens in unterschiedlicher Weise genutzt. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor hierbei ist die Möglichkeit eng tolerierte Innenflächen zu erzeugen. Dies können – aber müssen keine zylindrischen Flächen sein. Mit dem Rundkneten sind Verzahnungen, Polygonflächen, gestufte Durchmesserübergänge und sogar Nutenformen im Inneren rohrförmiger Wellen darstellbar.

1 Verfahrensdarstellung Rundkneten

1.1 Maschinenaufbau

Das Rundkneten gehört in die Sparte der Net-Shape-Forming Verfahren, die sich dadurch auszeichnen, dass die Endkontur der umgeformten Werkstücke ohne oder mit minimaler spanender Weiterbearbeitung erzielt wird. Als Halbzeug wird im Regelfall ein Rohr eingesetzt. Rundkneten ist ein sog. inkrementelles Umformverfahren, das heißt die Umformung wird in vielen kleinen Einzelschritten vollzogen. Die Umformwerkzeuge sind konzentrisch um das Werkstück angeordnet. Die Werkzeuge oszillieren hochfrequent mit geringem Hub. Der Werkzeugeingriff erfolgt in der Regel synchron. In Abbildung 1 ist die Anordnung der Werkzeuge um ein Werkstück dargestellt. Die runden Pfeile symbolisieren die Drehrelativbewegung zwischen beiden. Diese verhindert, dass der Werkstoff während der Umformung in die Spalten zwischen den Werkzeugsegmenten fließt. Die Doppelpfeile symbolisieren die Oszillationsbewegung der Werkzeuge mit denen die Umformarbeit verrichtet wird.

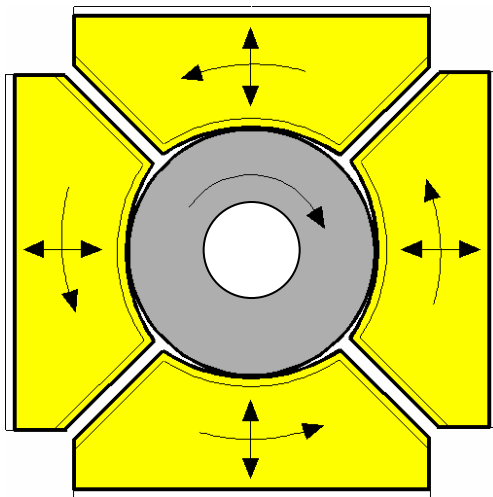


Abb. 1: Anordnung der Werkzeuge um ein Werkstück

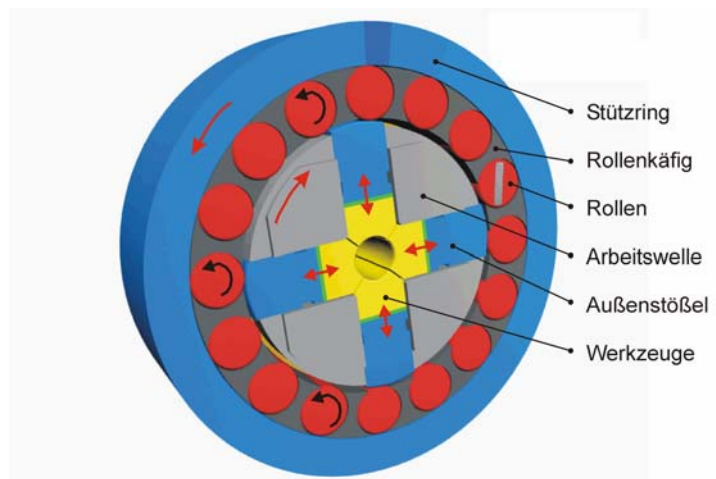


Abb. 2: Aufbau der umformtechnischen Kerneinheit einer Rundknetmaschine, der Radialumformeinheit

In Abbildung 2 ist der mechanische Aufbau dargestellt, mit der die Oszillationsbewegung der Werkzeuge realisiert wird. Die Anordnung ähnelt einem Planetengetriebe, wobei keine Zahnräder, sondern zylindrische Rollen zum Einsatz kommen. Die Werkzeugbewegung wird durch eine Drehrelativbewegung zwischen den sog. Außenstößeln (Nocken) und Rollen realisiert. Der Stößel wird radial nach innen gedrückt und gibt den Druck an das darunter liegende Werkzeug weiter. Die folgende Abbildung 3 verdeutlicht den Vorgang, der sich zwischen Außenstößel und Rolle abspielt. Durch die Geometrie der Kurve auf dem Stößel wird das Kraft-Weg Verhalten während der Umformung gesteuert. Die Umformkraft ist bei

diesem Vorgang das Resultat des durch die Kurve vorgegebenen Weges. Bei Rundknetmaschinen handelt es sich aus diesem Grund prinzipiell um weggesteuerte Schnellläuferpressen mit mehreren konzentrischen Wirkrichtungen.

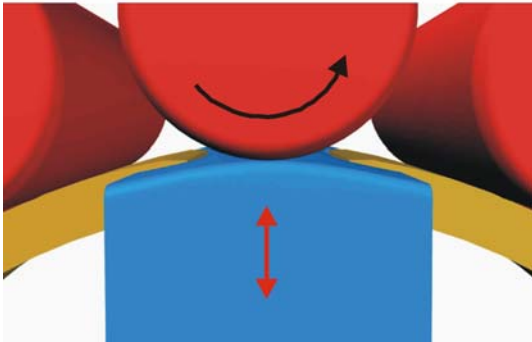


Abb. 3: Abwälzbewegung zwischen Rolle und Außenstößel

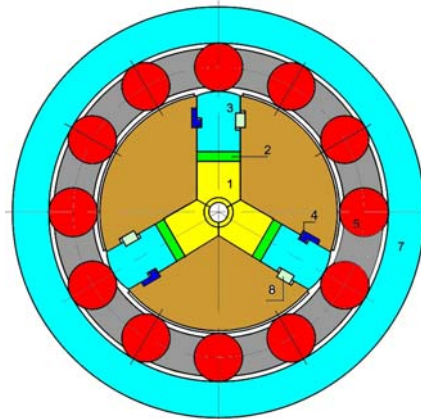


Abb. 4: Segmentierung der Werkzeuge in 3 Teile

Wie aus Abbildung 4 zu ersehen ist die vierteilige Segmentierung der Werkzeuge beim Rundkneten keineswegs vorgegeben. Durch eine Modifikation der Arbeitswelle sind Anordnungen mit zwei, drei, vier, fünf und sechs Segmenten realisierbar. Diese Modifikation kommt zumeist bei der Realisierung von nicht – rotationssymmetrischen Querschnitten zur Anwendung.

Der gesamte Anordnung wird während der Umformung mit einem niedrigviskosen Öl geflutet. Der Schmierbedarf ist Dank des inkrementellen Umformablaufs gering, der Reibungseinflüsse weitgehend ausschaltet. Aus diesem Grund erfüllt das Medium im wesentlichen Kühl- und Reinigungsfunktionen. Beide Funktionen verbessern sich mit steigendem Volumenstrom bei der Durchflutung, was die Wahl auf ein Öl mit niedriger Viskosität fallen lässt. Erwähnenswert ist, dass die Prozessschmierung und die Getriebeschmierung mit demselben Medium durchgeführt wird. Aus diesem Grund kommt der Reinigung des Mediums von Partikeln, die während der Umformung abgetragen werden eine wichtige Bedeutung zu.

Eine Rundknetmaschine ist wie die meisten Werkzeugmaschinen horizontal angeordnet. Sie besteht aus der beschriebenen Radialumformeinheit, einer Vorschubeinheit, die das Werkstück positioniert und aus Vorrichtungen zur Handhabung der Innenwerkzeuge. In Abbildung 5 wird der Aufbau in schematisierter Form dargestellt

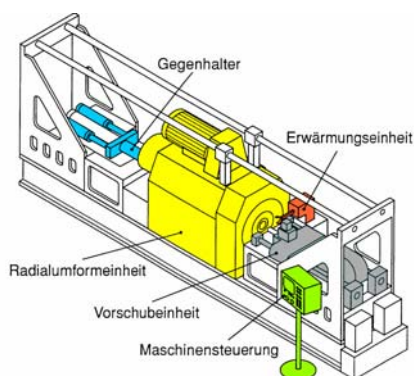


Abb. 5: Schematischer Aufbau einer Rundknetmaschine

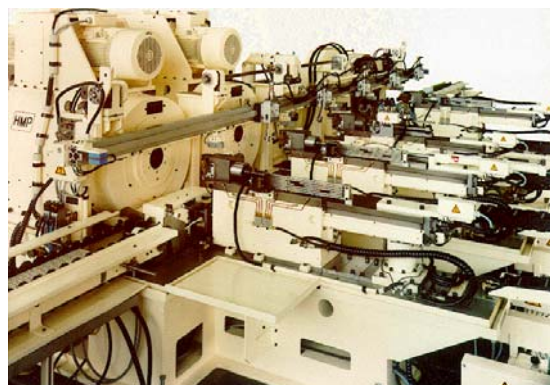


Abb. 6: Verkettete Anordnung mehrerer Rundknetmaschinen

Der relativ kompakte Aufbau ermöglicht es, mehrere Aggregate sequenziell hintereinander anzuordnen (siehe Abbildung 6) und durch ein Transfersystem miteinander zu verkoppeln. Der „klassische“ Werkzeugmaschinenaufbau einer Rundknetmaschine ermöglicht zudem die leichte Integration anderer Prozesstechnologien in ein solches Transferkonzept.

1.2 Verfahrensvarianten

Mit der beschriebenen Kinematik lassen sich mehrere Verfahrensvarianten realisieren. Beim Rundkneten wird grundsätzlich zwischen den Varianten Vorschubkneten und Einsteckkneten unterschieden.

Beim Vorschubkneten bewegt sich das Werkstück kontinuierlich in axialer Richtung durch die oszillierenden Werkzeuge. Der größte Teil der Umformarbeit wird im Einlaufkegel geleistet, der sich anschließende Zylinder kalibriert den gefertigten Querschnitt. Die Länge der Umformung ist beliebig. Die Anordnung der Werkzeuge um das Werkstück ist im Schnitt in Abbildung 7 und in Abbildung 8 dargestellt. Im Rohrinernen kann optional ein Innenwerkzeug eingesetzt werden. Dadurch wird der radiale Werkstofffluss nach innen unterbunden und im Rohrinernen kann eine eng tolerierte Funktionsfläche erzeugt werden. Häufig werden im Rohrinernen Mitnahmep Profile in Form einer Schiebeverzahnung realisiert. Abbildung 8 zeigt das Innenwerkzeug mit erzeugendem Profil.

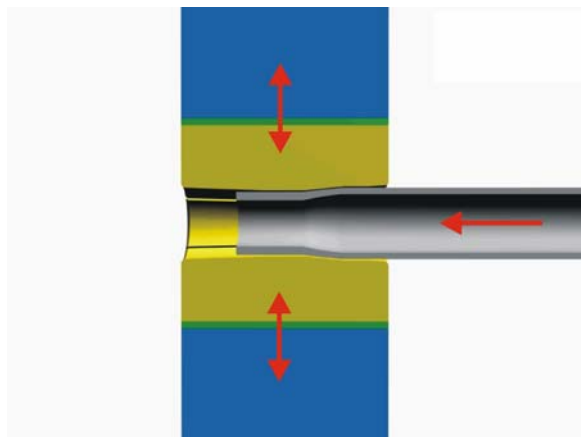


Abb. 7: Vorschubkneten ohne Innenwerkzeug

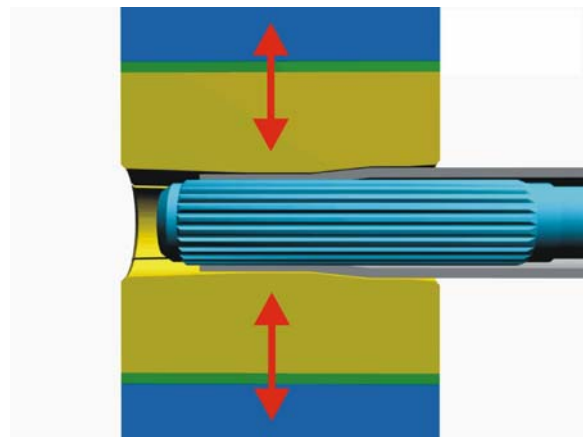


Abb. 8: Vorschubkneten mit (verzahntem) Innenwerkzeug

Die Doppelpfeile symbolisieren wieder die oszillierende Werkzeugbewegung. Der einfache Pfeil in Abbildung 7 zeigt die Bewegung des Werkstücks während der Umformung an. Je nach umzuformender Geometrie kann das Werkstück dabei entweder komplett in seiner ganzen Länge durch die Werkzeuge gefahren und damit vollständig umgeformt oder nach Erreichen der gewünschten axialen Position wieder zurückgefahren werden.

Die Möglichkeiten des Vorschubknetens werden durch den Übergangswinkel begrenzt. Steigende Übergangswinkel vergrößern den Axialkraftbedarf während des Umformvorgangs. Üblicherweise liegt die sinnvolle Grenze bei einem Schulterwinkel von max. 10° .

Beim Einsteckkneten führen die Werkzeuge zusätzlich zur Oszillation eine radiale Zustellbewegung aus. Die Übergangswinkel können bei dieser Verfahrensvariante wesentlich steiler sein als beim Vorschubkneten. Die Kinematik von Werkzeugen und Werkstück beim Einsteckkneten wird in Abbildung 9 und 10 dargestellt.

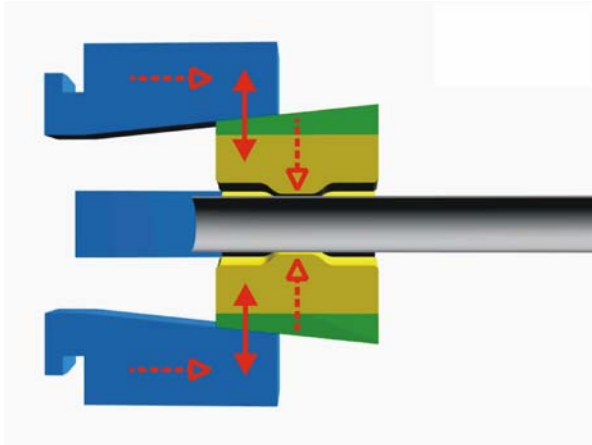


Abb. 9: Einstechkneten – geöffnetes Werkzeug

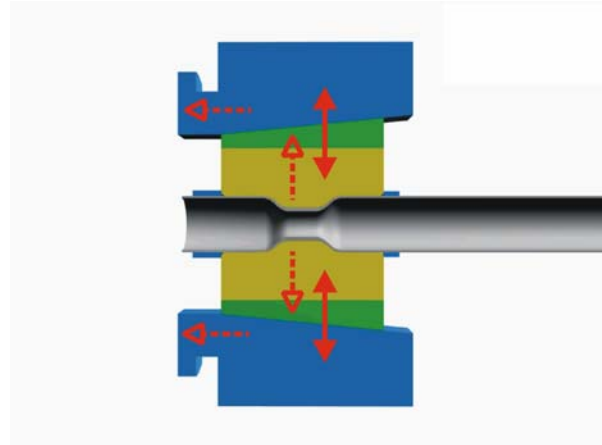


Abb. 10: Einstechkneten – geschlossenes Werkzeug

Die Außenstößel sind keilförmig gestaltet und lassen sich axial verschieben (gestrichelter Pfeil axial). Mit Hilfe des Zwischenkeils wird diese Axialbewegung in eine Radialbewegung umgewandelt (gestrichelter Pfeil radial). Die Zustellbewegung erfolgt während der Oszillation. Die Anordnung erlaubt die Realisierung von Reduzierungen im Hinterschnitt, also zwischen zwei Enden mit größerem Durchmesser. Selbstverständlich kann auch bei dieser Verfahrensvariante mit einem Innenwerkzeug (Dorn) gearbeitet werden.

Neben der Realisierung rotationssymmetrischer Umformungen sind auch symmetrische Polygon- oder Mehrflachprofile darstellbar. Dazu ist es notwendig die Drehrelativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug abzuschalten. Wird dies getan, so besteht die Gefahr, dass der Werkstoff zwischen die Werkzeugsegmente fließt. Um dies zu verhindern ist eine Volumenabstimmung vor und nach der Umformung notwendig. Kleine Radien oder gar scharfe Kanten können nicht realisiert werden.

2. Anwendungen für das Rundkneten

Das Rundkneten findet seine Anwendung in einer breiten Palette von Bauteilen für die Automobilindustrie. Es handelt sich dabei üblicherweise um wellenförmige Komponenten. Beispiele hierfür sind:

- Lenksäulen
- Antriebs- oder Seitenwellen
- Kardanwellen
- Getriebewellen
- Etc.

Die folgenden Abbildungen 11-16 zeigen einige durch Rundkneten dargestellte Bauteile, die sich zum Teil im Serieneinsatz befinden.

Bei allen genannten Anwendungen wurden massive Bauteile durch Hohlkonstruktionen ersetzt. Dadurch konnte teilweise mehr als 50% Gewicht eingespart werden. Daneben war es möglich, das Rohrinne als zusätzliche Funktionsfläche zu nutzen. Bei vielen Bauteilen ermöglicht dieser „Nebeneffekt“ völlig neue Nutzungsperspektiven. Wie bereits beschrieben entsteht die Innenkontur beim Umformen von Rohren durch Rundkneten ohne erheblichen Mehraufwand mit. Zusätzlichen Aufwand stellen allenfalls die anfallenden Kosten durch den Verschleiß der Innenwerkzeuge dar.

Konstruktiv werden Funktionsflächen im Inneren von Rohren meist vermieden, weil die Herstellung durch konventionelle Verfahren sehr teuer ist. Die Realisierung einer Welle durch

12. Sächsische Fachtagung Umformtechnik

Rundkneten ermöglicht die platz- und gewichtssparende Nutzung aller Wellenbereiche meist ohne Mehraufwand. Das Verfahren ermöglicht die Fertigung von Formen in einer Toleranzklasse IT 6-7.



Abb. 11: Lenksäule mit integrierter Gabel



Abb. 12: Lenksäule mit Sechskant-Anschluss



Abb. 13: Polygonale Innenform mit Stufen



Abb. 14: Welle mit spiralförmigen Kugelbahnen



Abb. 15: Anlasserwelle mit schräger Innenverzahnung



Abb. 16: Wandstärkenoptimierte Antriebswelle

Durch die Integration der kompletten mechanischen Bearbeitung im weichen Zustand in ein effizientes Anlagenkonzept konnten die Herstellkosten oft noch gesenkt werden. Als ergänzende Bearbeitungsschritte um das Rundkneten herum kommen folgende Verfahren zur Anwendung:

- Pressen von Schiebeverzahnungen und / oder Aufweiten auf einer hydraulischen Horizontalpresse
- Fügebearbeitung auf einer hydraulischen Horizontalpresse
- Dreh- und Fräsbearbeitung von Wellenenden
- Rollierbearbeitung von Sicken
- Einfurchen von Gewinden
- Stanzen
- Fließbohren
- Reinigen / Waschen
- Markieren
- Prüfen
- Etc.

Die Abbildungen 17 und 18 stellen durch Rundkneten hergestellte Getriebewellen dar.



Abb. 17: Schaltgetriebewelle LKW



Abb. 18: Schaltgetriebewelle PKW

3 Halbzeuge und Werkstoffe für das Rundkneten

Prinzipiell ist das Verfahren bezüglich der verwendbaren Halbzeuge und Werkstoffe sehr robust. Durch den hohen hydrostatischen Spannungsanteil, insbesondere bei der Verwendung eines Innenwerkzeugs können auch Werkstoffe mit niedrigen Dehnungswerten noch umgeformt werden. Eine systematische Untersuchung, die den Zusammenhang erreichbarer Umformgrade mit dem Festigkeitszustand der verwendeten Werkstoffe in Verbindung bringt wurde noch nicht durchgeführt.

Üblich ist die Verwendung konventioneller Baustähle wie St 52. Im vorher geglühten Zustand (NBK) können hier Umformgrade von ca. 150% problemlos bei Raumtemperatur realisiert werden. Umgeformt werden allerdings auch Stähle mit höherem C-Gehalt wie z.B. C40, C45 C53 oder 100 Cr 6.

Grundsätzlich eignet sich das Verfahren zur Umformung von stabförmigem und von rohrförmigem Halbzeug. Als formgebendes Verfahren wird das Rundkneten meist zur Rohrumformung genutzt. Verwendung finden hier im allgemeinen Präzisionsstahlrohre der Normen:

- DIN 2391: Nahtloses, gezogenes Rohr
- DIN 2393: Geschweißtes und kalt nachgezogenes Rohr
- DIN 2394: Geschweißtes, maßgewalztes Rohr

Von der Warte des Umformers gesehen ist das Rohr nach DIN 2393 das hochwertigste Halbzeug, da es die besten Ausgangstoleranzen bei der Konzentrität und damit der Wandstärke und die besten Oberflächenqualitäten bietet. Die Wandstärkentoleranz des verwendeten Halbzeugs beeinflusst bei der Umformung mit Innenwerkzeug das Ergebnis erheblich. Der unterschiedliche axiale Werkstofffluss führt zu einer Verschlechterung der Geradheit und der Rundlaufeigenschaften. Dem gegenüber steht das Risiko der Schweißnahtqualität. Geschweißtes Rohr wird dennoch sehr oft eingesetzt und verursacht bei der Bearbeitung keine Schwierigkeiten. Um die Funktionsfähigkeit des Schweißrohres qualitativ abzusichern wird von den Rohrherstellern eine Prozessüberwachung zu 100% mit Wirbelstrom und Ultraschall gefordert.

Das gezogene Rohr nach DIN 2391 kommt meist dort zum Einsatz wo es wegen der Wandstärke das einzige verfügbare Halbzeug ist oder wenn der Werkstoff eine Rohrherstellung durch Schweißen verhindert. Neben den leider sehr unbefriedigenden Wandstärkentoleranzen weist das gezogene Rohr einen weiteren entscheidenden Nachteil auf: Der Herstellprozess kann bisweilen im Rohrinernen Risse und Überwerfungen verursachen. Die Hersteller nennen dies „Ungänzen“ und weisen darauf hin, dass mit den eingesetzten Prüfverfahren solche Fehler mit einer Tiefe $< 0,3\text{mm}$ nicht detektiert werden können. Streng genommen scheidet das Rohr damit für den Einsatz bei oberflächenempfindlichen Anwendungen aus. Es kann eben nicht sichergestellt werden, dass eine solche Ungänze in einem empfindlichen Bereich auftaucht. Zudem besteht die Gefahr, dass sich Überwerfungen durch den Umformprozess öffnen und als „Krater“ z.B. Leckagen an Dichtungsstellen verursachen.

Um dies zu verhindern bleibt nur der Weg, das Rohr vor der Umformung auf seiner gesamten Länge innen auszudrehen. Schön daran ist, dass sich durch diesen Weg auch die Wandstärkentoleranz verbessert. Unschön ist allerdings, dass das ohnehin schon relativ teure Halbzeug damit noch teurer wird und damit üblicherweise den wirtschaftlichen Rahmen sprengt.

Seit ca. zwei Jahren tut sich an dieser Stelle eine interessante Alternative auf. Bei dickwandigen Rohren, die eine bestimmte Länge nicht überschreiten macht es Sinn sog. warmgewalztes Rohr einzusetzen. Dieses weist an sich unbrauchbare Oberflächenqualitäten und Wandstärkentoleranzen auf. Die Verzunderung an der Außenhaut kann jedoch befriedigend durch Abbeizen entfernt werden. Die Innenkontur wird ausgedreht. Auf diese Weise entsteht ein ideales Halbzeug für die Umformung von Getriebewellen und anderen eher dickwandigen Teilen mit hohen Anforderungen an die Innenkontur. Von den Kosten ist dieses Rohr natürlich stark an eher kurze Werkstücke gebunden, da der Aufwand für das Ausdrehen mit steigender Länge stark zunimmt.

Die folgende Abbildung 19 zeigt zwei dickwandige Rohrabschnitte wie sie für Werkstücke in Abbildung 20 eingesetzt werden. Die meist hohen Anforderungen an die Oberflächen erfordern die Verwendung von Halbzeugen mit garantiert fehlerfreien Innenoberflächen. Die Außenkontur wird meist eh spanabhebend nachbearbeitet. Oberflächenfehler beim verwendeten Rohr werden dabei entfernt.



Abb. 19: Dickwandige Rohrabschnitte



Abb. 20: Geknetete Innenkonturen

4 Rundkneten von Statorwellen für Automatikgetriebe

4.1 Aufgabenstellung

Die Statorwelle ist ein Bestandteil eines Wandler-Automatikgetriebes mit hohen Anforderungen an Rundlauf- und Durchmesser toleranzen. Im Welleninneren befinden sich Passdurchmesser für Dichtungen und Lager. Dementsprechend werden hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität gestellt.

Mit dem etablierten Fertigungsprozess wurde ein rohrförmiges Halbzeug mittels Fließpressen umgeformt. Nach der Umformung war die gesamte Innenkontur spanabhebend nachzuarbeiten. Dieser Aufwand soll nun eingespart werden. Der neue Umformprozess soll die Werkstücke so herstellen, dass eine Nachbearbeitung der Innenkontur nicht mehr notwendig ist.

Die Festigkeitsanforderungen liegen bei ca. 700 N/mm². Dies und die vorgesehene partielle induktive Wärmebehandlung im Lauf der Prozesskette machen die Verwendung eines Stahls mit hohem C-Gehalt notwendig. Die damit im Zusammenhang stehenden niedrigen Dehnungswerte (A5) erschweren die Aufgabe zusätzlich.

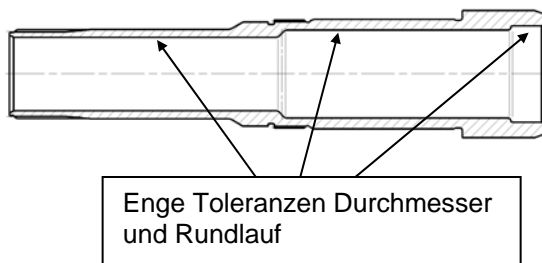


Abb. 21: Statorwelle 1, gedreht

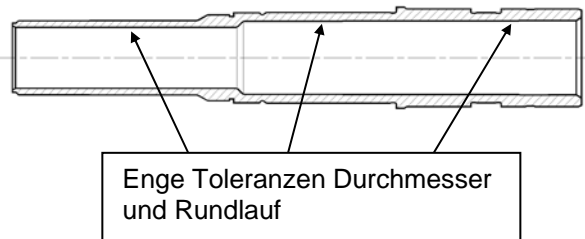


Abb. 22: Statorwelle 2, gedreht

Die hohe Stückzahl soll mit einer einzigen Anlage abgedeckt werden können. Dies erfordert eine Taktzeit von ca. 20 Sekunden. Neben der Umformung soll die Anlage noch eine Endbearbeitung durchführen mit der das Teil eine Zentrierung erhält.

4.2 Prozessentwicklung

Aufgrund der Taktzeit muss der Umformprozess in mehrere Zwischenstufen zerlegt werden. Die Genauigkeitsanforderungen machen jedoch eine Kalibrierung über dem Innenwerkzeug im letzten Umformschritt über dessen gesamte Länge erforderlich. Andernfalls gehen bei der Realisierung der verschiedenen Innendurchmesser über verschiedenen Innenwerkzeugen die Bezüge zueinander verloren.

Die Erzeugung der Außenkontur des Fertigteils durch Umformung wird bei der Prozessentwicklung von der Priorität klar hinter die Innenkontur gestellt. Die auf der Außenseite der Welle geforderten Übergänge, Nuten und Durchmesser toleranzen machen ein Nachdrehen eh erforderlich. In den folgenden Abbildungen 23 und 24 werden die umgeformten Konturen dargestellt.

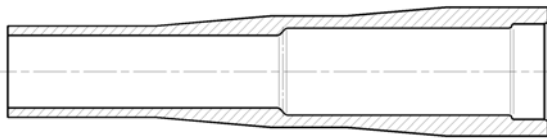


Abb. 23: Statorwelle 1, umgeformt

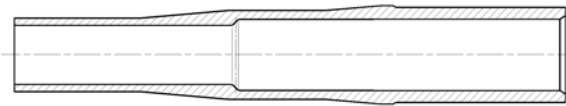


Abb. 24: Statorwelle 2, umgeformt

Das Konzept sieht einen dreistufigen Umformprozess vor. Ausgehend von einem ausgedrehten Rohrabschnitt werden 2 Vorformstufen erzeugt. Beide Vorformstufen werden mittels Vorschubkneten realisiert. In der dritten Umformstufe wird die Vorform auf der gesamten Länge auf dem letzten Innenwerkzeug mit wenig Umformgrad nachkalibriert. Dazu kommt das Einstechkneten mit positionierbarem Vorschubsystem zum Einsatz. Mit dieser Vorgehensweise gelingt es, alle Anforderungen an den Prozess zu erfüllen. Die folgenden Abbildungen 25 und 26 zeigen die erzielten Umformresultate



Abb. 25: Umformergebnis Statorwelle 1



Abb. 26: Umformergebnis Statorwelle 2

Die folgende Abbildung 27 zeigt die Stadienfolge bei der Umformung. Abgebildet wird der Prozess auf einer mehrstufigen Transferanlage, die in Abbildung 28 dargestellt ist. Die Anlage befindet sich im Betrieb und fertigt ca. 700.000 Stück p.a.



Abb. 27: Stadienfolge Statorwelle



Abb. 28: Transferanlage Statorwelle

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die beschriebene Prozessentwicklung hat gezeigt, dass das Rundkneten bei zielorientiertem Einsatz für die Herstellung von Bauteilen mit hohen Anforderungen an die Innenkontur eine sehr wirtschaftliche Lösung sein kann. Damit hat das Verfahren das Potential, aus seinem Nischendasein herauszutreten und für viele vergleichbare Anwendungen zum Einsatz zu kommen. Mittlerweile stellt der Markt wirtschaftlich sinnvolle Halbzeuge in Form von Rohrabschnitten zur Verfügung.

Wesentlich für die Umsetzung eines solchen Projektes ist allerdings erstens Zeit (ca. 6 Monate für die gesamte Prozessentwicklung) und zweitens Kooperationsbereitschaft bei der Bauteilgestaltung. Bei der Entwicklung des vorgestellten Umformprozesses wurden gemeinsam mit dem Gestaltungspartner beim Kunden viele für die Funktion unwichtige Details aus der Zeichnung „eliminiert“. So ist dieser Prozess ein Paradebeispiel für ein funktionierendes „Simultaneous Engineering“.

Bei intensiver Nutzung der Möglichkeiten des Rundknetverfahrens können sicherlich noch bei vielen Werkstücken teure weil zeit- und werkzeugintensive Innendreh-, Innenschleif-, Räum-, Hohn- und Läppbearbeitungen eingespart werden.