

Zahnwellenverbindungen mit Novikovprofil

Dietz, P.; Wächter, M.

Ein Forschungsschwerpunkt des Institutes für Maschinenwesen ist die Untersuchung von Welle-Nabe-Verbindungen angesiedelt. Formschlüssige Verbindungen mit einer Kreisbogen-Verzahnung lassen aufgrund ihrer konvex - konkaven Flanken-geometrie gegenüber den Evolventen- und Keilverzahnungen eine erhöhte Zahnfuß- und Flanken-tragfähigkeit erwarten. Durch Ausnutzung des Kontakts in den weiter außen liegenden Flankenteilen wird ein verbessertes Zentrierverhalten gegenüber der praktisch nur flanken-zentriert eingesetzten Evolventen - Verzahnung erreicht. Die grundsätzlich kompaktere Form des Zahnes mit Kreisbogenprofil sollte eine fertigungsgerechtere Herstellung mittels Kaltumformen erlauben.

Positive fit connections with circular arc type teeth are expected to have a larger tooth foot and tooth face load carrying capacity than evolvent and spline type tooth connections due to their convex - concave tooth geometry. By making use of the contact in the radially outer part of the flanks, a better centring behaviour than with the practically only flank centred use of evolvent tooth shapes is assumed. The basically more compact shape of teeth with circular arc shape should enable easier manufacturing by cold forming.

1 Welle-Nabe-Verbindungen

Welle-Nabe-Verbindungen dienen zum Übertragen von Drehmomenten und Drehbewegungen von einer Welle auf eine Nabe oder umgekehrt. Darüber hinaus können sie aber auch Quer- und Axialkräfte sowie Biegemomente übertragen. Je nach Art der Kraftübertragung werden Reibschluss-, Formschluss-, vorgespannte Formschluss- und Stoffschluss-Verbindungen unterschieden.

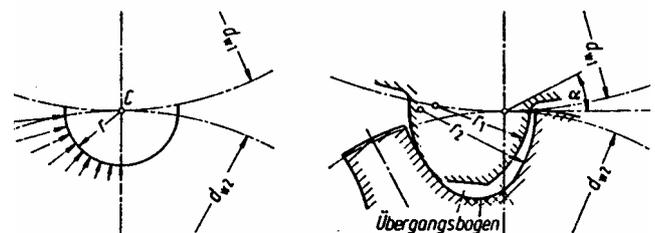
Zahnwellenverbindungen gehören zu der Gruppe der Formschlussverbindungen. Aufgrund einer feinen Verzahnung (viele Zähne) und der geringen Schwächung von Welle und Nabe können Zahnwellenverbindungen große und stoßartige Drehmomente übertragen. Die geringere Schwächung von Welle und Nabe bei Zahnwellenverbindungen im Gegensatz zu Keilwellenverbindungen ermöglicht

die Verwendung kleinerer Durchmesser und schmalere Naben. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass durch den Flankenwinkel eine Radialkomponente der Normalkraft entsteht, die dazu führen kann, dass sich schwache Naben aufweiten.

Ausgeführt werden Zahnwellenverbindungen zum einen als leicht lösbare und somit axial verschiebbare Verbindungen und zum anderen als feste Verbindungen (vorgespannte Formschlussverbindungen), die vor allem bei Wechselbeanspruchungen verwendet werden. Gewöhnlich werden Zahnwellen mit Kerbzahnprofil (nach DIN 5481) oder Evolventenzahnprofil (nach DIN 5480) hergestellt.

2 Zentrier-, Verschleißverhalten und Tragfähigkeit des Novikov Grundprofils

Verzahnungen mit Novikov Grundprofil, deren Zahnflanken im Normal- bzw. Stirnschnitt Kreisbogenform aufweisen, sind in den USA von Wildhaber (Kreisbogenform im Normalschnitt) und in der ehemaligen UdSSR von Novikov (Kreisbogen im Stirnschnitt) entwickelt und untersucht worden **Bild 1**.



Wildhaber-Novikov-Verzahnung
links: theoretisches Grundprofil
rechts: asymmetrisches Profil aus zwei Kreisbögen $r_2 > r_1$

Bild 1: Wildhaber-Novikov-Verzahnung /1/

Diese Zahnform wird bisher nur in Stirnverzahnungen (Laufverzahnungen) eingesetzt. Die im Eingriff befindlichen Flanken dieser Zahnform berühren sich nur in einem Punkt (Eingriffspunkt), der beim Lauf auf einer Geraden (Eingriffslinie) längs der Zahnbreite wandert.

Der Eingriffswinkel ist in jeder Zahnstellung konstant, so dass die Zahnkraft ihre Richtung nicht ändert. Daraus resultiert eine Null-Profilüberdeckung dieses Zahnprofils ($\epsilon_\alpha = 0$!!!).

Die Zähne der Wildhaber-Novikov-Verzahnung sind dabei nur etwa halb so hoch wie Evolventenzähne mit gleichem Modul. Bei Verzahnungen mit Novikov Grundprofil ist jeweils der konvexe Teil eines Zahnes mit dem konkaven Teil des Zahnes vom Gegenrad im Eingriff (**Bild 2**), so dass sich günstige Pressungsverhältnisse ergeben.

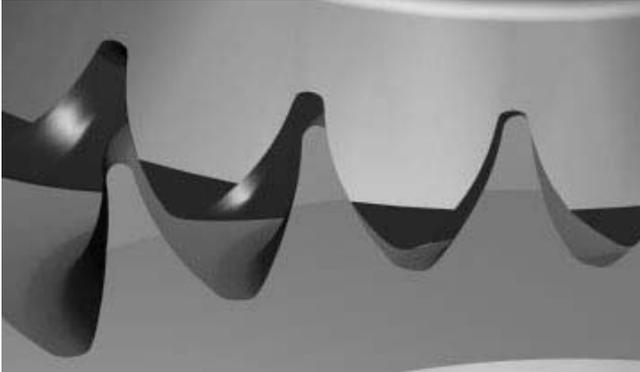


Bild 2: Wildhaber-Novikov-Verzahnung /2/

Die Abnutzung ist erfahrungsgemäß gering. Die Masse beträgt etwa die Hälfte eines entsprechenden Getriebes mit Evolventen-Verzahnung gleicher Leistung. Nachteilig ist die Empfindlichkeit der Wildhaber-Novikov-Verzahnung gegenüber Achsabstandsveränderungen und daraus resultierenden erhöhten Verschleiß. Außerdem sind zur Herstellung der Verzahnung für Rad und Gegenrad verschiedene Verzahnwerkzeuge erforderlich.

Aus theoretischen Erörterungen ergibt sich, dass die Tragfähigkeit dieser Getriebe in Bezug auf Flankenpressung besonders hoch ist. Der bei Stirnverzahnungen auftretende fehlende Überdeckungsgrad ist bei Zahnwellen-Verbindungen ohne Belang, weil bei Zahnwellen-Verbindungen alle Zähne gleichzeitig in Eingriff sind. Ebenso entfällt der bei Stirnverzahnungen erhöhte Verschleiß während des Abwälzvorganges durch die geringere Relativbewegung der Flanken zueinander. Die unterschiedlichen Werkzeuge für Außen- und Innenverzahnung sind prinzipbedingt bei der Herstellung von Welle-Nabe-Verbindungen grundsätzlich notwendig.

Ausgangspunkt für die Untersuchungen zur Verbesserung der Tragfähigkeit von Wellen-Naben-Verbindungen mit Kreisbogen waren folgende Hypothesen:

- Kreisbogen-Verzahnungen lassen aufgrund ihrer konvex-konkaven Flankengeometrie gegenüber den Evolventen-Verzahnungen eine erhöhte Zahnfuß- und Flankentragfähigkeit erwarten. Hierdurch ist eine Leis-

tungssteigerung bei gleichen Hauptabmessungen der Verbindung möglich.

- Durch Ausnutzung des Kontakts in den weiter außen liegenden Flankenteilen wird ein verbessertes Zentrierverhalten gegenüber der praktisch nur flankenzentriert eingesetzten Evolventen-Verzahnung angenommen. Damit können aufwendige Fremdzentrierungen oder die fragwürdigen Doppelzentrierungen an Flanken- und Durchmesserbereich entfallen.
- Die grundsätzlich kompaktere Form des Zahnes mit Kreisbogenprofil sollte eine fertigungsgerechtere Herstellung mittels Kaltumformen erlauben. Die bekannten Anrisse im Fußbereich und die Wülste an den Zahnköpfen entfallen, die Eigenspannungen durch Umformen tragen zur Festigkeitssteigerung bei und der Fertigungsprozess wird preisgünstiger.

Die Zielsetzung ist die Entwicklung eines neuen Verzahnungsprofils mit Kreisbogenverzahnung für Zahnwellenverbindungen, abgeleitet aus dem Novikov-Grundprofil für Laufverzahnungen und seine Optimierung bezüglich der oben beschriebenen Betriebseigenschaften.

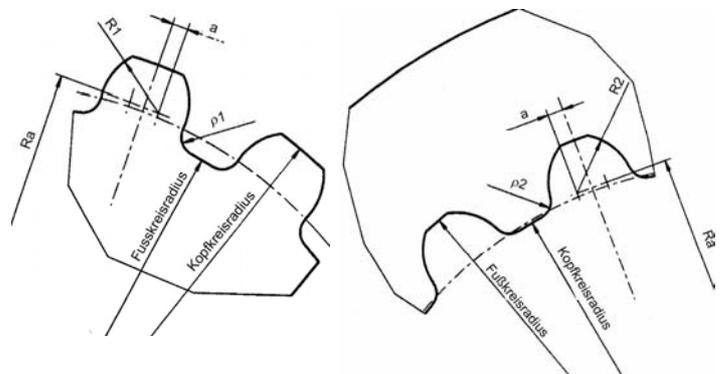


Bild 3: Novikov-Grundprofil, Bezeichnungen und Abmessungen /3/

Als Parameter für die Simulationsuntersuchungen wird die Geometrie des Zahnprofils, beschrieben durch die Radien R_1 und R_2 (**Bild 3**) der Flankenkrümmung und die Fußausrundungen ρ_1 und ρ_2 , den Modul m der Verzahnung, die Zähnezah z und den Nabenaußendurchmesser variiert.

Mit Hilfe der FE-Methode wurde zunächst nach einer optimalen Flankengeometrie unter Beanspruchungskriterien gesucht (Referenzverzahnung mit Modul 3 mm und 18 Zähnen). Diese FE-Rechnungen erfolgten für ebene Modelle unter reinem Drehmoment, dabei wurde der Wellengrundkörper eingespannt und das Drehmoment in Form

einer Umfangskraft auf den Nabenaußendurchmesser aufgebracht. Variiert wurde zunächst der Abstand Wellenmittelpunkt zu Krümmungsradienmittelpunkt Flanke (R_a), beim Beanspruchungsminimum liegt gleichzeitig die größte Kontaktlänge über der Zahnhöhe vor. Eine Veränderung dieses Abstandes bewirkt, dass der Zahnflankenwinkel bei einem großen Abstand steiler ist als bei einem kleineren Abstand. Infolge dieser Abstandsvariation ändern sich dementsprechend auch die Abstände der Mittelpunkte der Flankenradien der Nabe. Bezieht man diesen Abstand auf den Teilkreisradius, liegt das Optimum für eine "positive Profilverschiebung" von ungefähr 1 % bzw. einem Profilverschiebungsfaktor von $x = 0,0833$ vor. Für diese Geometrievariante wird ein Optimum für den Flankenkrümmungsradius der Welle gesucht, dabei wird das Verhältnis des Krümmungsradius Welle zu Nabe konstant gehalten. Es zeichnet sich ein Optimum für ein Verhältnis Modul zu Wellenkrümmungsradius von 1,257 ab. Im Weiteren ist zu untersuchen, ob sich anhand von Ähnlichkeitsgesetzen diese Ergebnisse auch auf Zahnwellenverbindungen mit anderen Moduln und Zähnezahlen übertragen lassen.

Die bisherigen Ergebnisse haben gezeigt, dass sich mit Hilfe einer optimierten Zahnform nach dem Novikov-Grundprofil bei ideal elastischem Werkstoffverhalten eine rechnerische Spannungsreduzierung im Zahnfuß auf 77 % (**Bild 4; Bild 5**) bei der Flankenpressung auf 53 % bei reiner Drehmomentbelastung und auf 84 % bei einer reinen Querkraftbelastung gegenüber einer Zahnwellengeometrie mit Evolventenflanken nach DIN 5480 bei gleichen Grundabmessungen erzielen lässt.

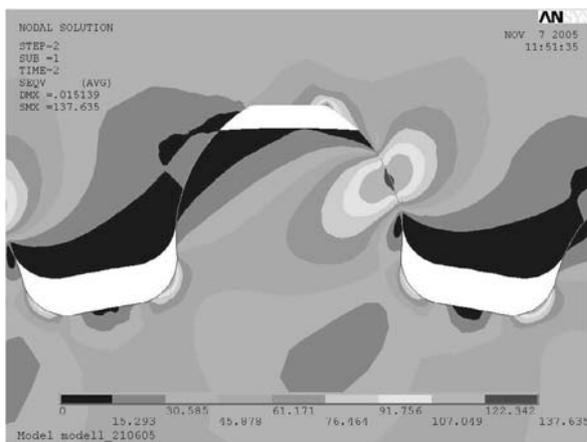


Bild 4: Vergleichsspannung Novikovverzahnung, rein elastisch, 800Nm

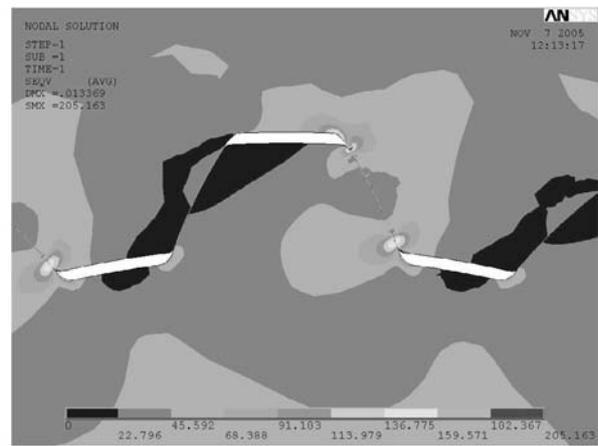


Bild 5: Vergleichsspannung Evolventenverzahnung, rein elastisch, 800Nm

Bei idealelastisch-plastischem Werkstoffverhalten und Steigerung des Drehmomentes zeichnet sich die Novikovverzahnung gegenüber der Evolventenverzahnung insgesamt als beanspruchungsgünstigere Verbindung aus.

Bei der Novikovverzahnung stellt sich im Nabenfuß ein Spannungsmaximum ein, Ursache ist in dem noch nicht optimierten Zahnfußausrundungsradius zu sehen. Bei der Evolventenverzahnung stellt sich eine steigende Spannung im Wellen- und Nabenfußbereich der Zugseite ein, die durch die genormte Zahngeometrie Probleme bereitet. Die Zugseite des Wellenzahnfußes weist bei der Evolventenform die maximale Fußspannung aus, wohingegen bei der Novikovform die Druckseite des Wellenzahnfußes höher belastet wird und somit weniger kritisch ist. Der Flächenpressungsverlauf weist Maxima am Zahnkopf (Kopfräger) und Zahnfuß (Fußträger) bei der Evolventenflanke auf, die Novikovflanke hingegen zeigt einen parabelförmigen Verlauf.

Bei steigender Drehmomentbelastung breitet sich die Zahnflankenbeanspruchung nur nach unten in Richtung Wellenzahnfuß aus, ein gewisser Teil des Wellenzahns bleibt immer unbeanspruchung und kann somit zur Flankenzentrierung dienen.

3 Herstellung durch Kaltumformen

Für den weitaus stückzahlmäßig größten Anwendungsbereich werden Zahnwellen heute kalt umgeformt, wobei die Kurzverzahnung nach DIN 5480 dem Umformprozess eher entgegenkommt als die übliche Laufverzahnung. Dies wird für die vorgesehene Verzahnung mit Kreisbogenprofil in noch stärkerem Masse zutreffen. Die durch den Umformvorgang induzierten Eigenspannungen erhöhen die

Lebensdauer der Zahnwellen-Verbindung speziell bei dynamischer Belastung /4, 5/.

Das Kaltwalzen im Grob-Verfahren nach **Bild 6** ist ein eingeführtes Umformverfahren, wobei die Form durch planetenartige Rollwerkzeuge nach dem Formverfahren erzeugt werden. Die Rollwerkzeuge werden formgeschliffen, das Verfahren nutzt den Abwälzvorgang nicht und damit auch nicht die einfache Form des geradflankigen Verzahnungswerkzeugs.

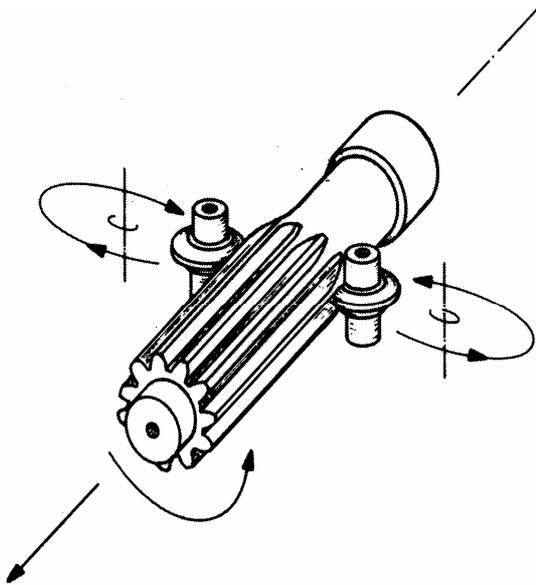


Bild 6: Kaltwalzen von Zahnwellen aus vollem Material nach GROB /6/

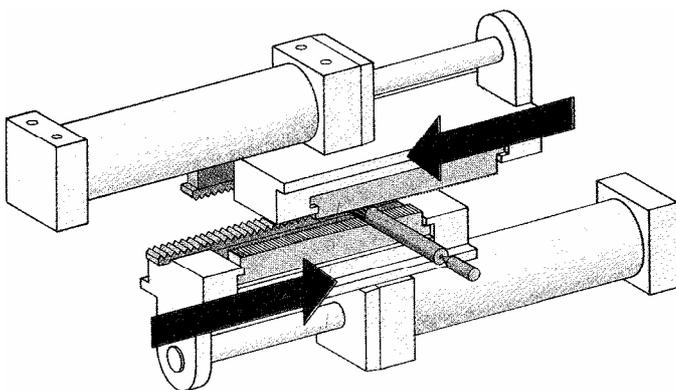


Bild 7: Kaltumformen mit Zahnstangen nach dem EX-CELL-O-Verfahren /7/

Das Kaltwalzen nach dem EX-CELL-O Verfahren gemäß **Bild 7** ist besonders für kurze Taktzeiten geeignet, wobei zwei gegenläufige Walzstangen das Zahnprofil nach dem Abwälzverfahren eindrücken und kalibrieren.

Ausgehend vom Feinwalzen spanend vorgearbeiteter geometrischer Konturen als Nachdrückprozess kann das Profil im Abwälzverfahren von umlaufen-

den Profilwalzrädern hergestellt werden. Die Profilräder müssen selbst im Abwälzverfahren hergestellt werden.

Daneben können Zahnprofile durch Taumelpressen, Ziehen und Rundkneten (bei Naben) hergestellt werden.

Die umformenden Verfahren zeigen Fertigungsabweichungen auf, die stark von der gewählten Form des Zahnprofils abhängen. Beispielsweise zeigt sich bei der Herstellung von Rundgewinden und Ölnuten mit dem dazugehörigen Kaltumformungsverfahren, dass Werkstücke ohne scharfe Ecken fertigungsgerechter sind. Aus diesem Grund wären auch Zahnwellen mit Kreisbogen-Grundprofil grundsätzlich für das Kaltumformen besser geeignet. Durch die Verwendung gleicher Werkzeuge bei der Kaltumformung und des damit verbundenen Auftretens von Fertigungsabweichungen wird die mögliche Gefahr der Doppelpassung verhindert.

Erste Untersuchungen zeigen, dass es prinzipiell möglich ist durch Kaltumformung ein Novikov - Zahnprofil als Wellenprofil zu erzeugen, allerdings wird der Werkzeugwerkstoff sehr stark bis in den plastischen Bereich hinein belastet, so dass Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit der Zahngeometrie zu erwarten sind und entsprechende Korrekturen beim Werkzeug Berücksichtigung finden müssen. Die FE - Rechnung zeigt ebenfalls, dass sich vor allem im Zahnfußbereich der Welle recht hohe Eigenspannungen gebildet haben, die praktisch zu einer Verfestigung an bestimmten Stellen führen und sich insgesamt positiv auf die Belastbarkeit der Verbindung auswirken können. Die Spannungsverteilung deutet darauf hin, dass der Werkstoff bei der Welle und dem Werkzeug besonders in Umfangsrichtung fließt. Das heißt, dass die hohen örtlichen plastischen Dehnungen, welche zu den Eigenspannungen führen, vor allem in Umfangsrichtung auftreten. Die Ergebnisse zu den bleibenden Eigenspannungen der Welle lassen erkennen, dass der Wellenwerkstoff beim Umformen nach außen gedrückt wird, wobei die örtlichen plastischen Dehnungen besonders im Bereich des Zahnfußes der Welle auftreten.

Bedeutenden Einfluss auf die Realisierbarkeit von großen Zahnmodulen bei der umformtechnischen Fertigung hat neben der Druckfestigkeit (Rissbildung) die maximal aufzubringende Eindringkraft (Kraft in Radialrichtung). Die auf die Stempellänge bezogene maximale Eindringkraft wird mit geringer werdender Zähnezahlnzahl bzw. steigendem Modul bei konstantem Wellendurchmesser deutlich größer.

Die Ursache liegt in der mit steigendem Modul einhergehenden Erhöhung der Eindringtiefe, da mit dem Modul sich die Zahnhöhe verändert und somit der Umformgrad ansteigt.

Die FE - Simulationen zur Herstellung einer kaltumgeformten Nabe mit dem Novikovprofil wurden für Stahl- und Aluminiumnaben durchgeführt, wobei jeweils ein Stahlwerkzeug als Stempel diente. Die Auswertung der Rechnung gibt Informationen zu den Radial- und Umfangsspannungen im Umformprozess und die nach dem Umformen sich einstellenden Eigenspannungen und bietet somit die Basis zur Beurteilung der Fertigungsmöglichkeiten. In einem einfachen Pressenversuch wurden die Ergebnisse der FE - Simulation verifiziert, dazu wurde eine Welle mit einem Zahn als Umformstempel in die Nabe gedrückt und dabei die Umfangsdehnung (Spannung) auf dem Nabenaußendurchmesser gemessen. Der Versuchsaufbau für einen Umformstempel mit Kreisbogenprofil ist in **Bild 8** dargestellt.



Bild 8: Umformprozess einer Nabe mit Novikovstempel

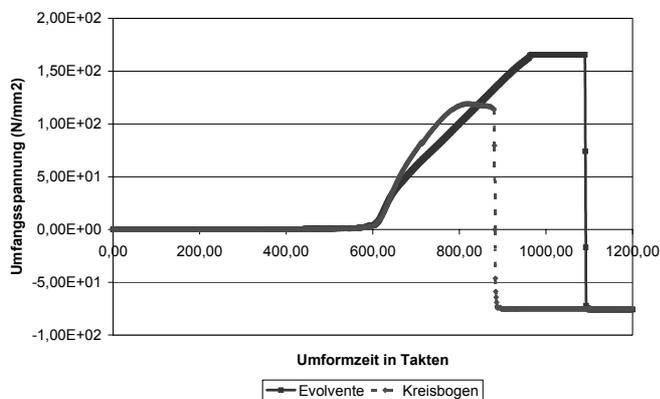


Bild 9: Umfangsspannung am Nabenaußendurchmesser während des Umformvorganges

Der zeitliche Verlauf der Umfangsspannung am Nabenaußendurchmesser während des Pressvorganges ist in **Bild 9** für einen Zahn mit Evolventenprofil und mit Kreisbogenprofil bei gleichem Modul dargestellt.

Während des Eindringens des Werkzeugstempel bildet sich auf dem Nabenaußendurchmesser in Umfangsrichtung eine Dehnung und somit eine Zugspannung aus, nach dem Herausfahren des Werkzeugstempels hat sich am Innendurchmesser eine Zahnücke in der Nabe mit dem entsprechenden Profil ausgebildet und am Nabenaußendurchmesser bildet sich eine Stauchung und somit eine Druckspannung in Umfangsrichtung aus. Der Umformprozess beim Evolventenzahn geht aufgrund der größeren Zahnhöhe bei gleichem Modul über einen längeren Zeitraum und verursacht eine höhere Umfangsspannung am Nabenaußendurchmesser. Der Anstieg der Umfangsspannung bei der Evolvente spiegelt die steilere Flankenform wieder. Die Nabe mit dem Kreisbogenprofil weist nach dem Umformen keine sichtbaren Anrisse auf, die Nabe mit dem Evolventenprofil dagegen Anrisse im Bereich des Nabenzahnfußes, d.h. dem Bereich des größten Umformgrades.

Die Eigenspannungen nach dem Umformprozess ergeben beim Versuch höhere Werte als bei der FE-Simulation, die Umfangsspannung während des Umformvorganges hingegen ist bei der Simulation höher als bei der Messung und weist jeweils für die Evolvente die höheren Werte auf. Es muss angemerkt werden, dass bei den FE-Untersuchungen vorerst keine Reibungseinflüsse berücksichtigt werden, wobei im Versuch durchaus ein Reibungseinfluss Stahlwelle zu Aluminiumnabe vorherrscht.

Die FE-Untersuchungen unter den gleichen Randbedingungen liefern für die Kombination Stahlwelle/Stahlnabe eine ähnliche Tendenz, die Druckeigenspannung am Nabenaußendurchmesser nach dem Umformen beträgt aber nur 50% der Eigenspannung bei der Nabe aus Aluminium. Dies führt zu der Annahme, dass es bei der Stahlnabe zu geringeren bleibenden Verformungen am Außenumfang während des Umformprozesses kommt.

4 Ausblick

Im ersten Schritt der Untersuchungen wurde eine Optimierung der Zahngeometrie für Zahnwellenverbindungen mit dem Novikov-Grundprofil durchgeführt. Ziel dieser - vorwiegend auf der Anwendung von Finite-Elemente-Methoden beruhenden - Un-

tersuchung war eine Funktionsoptimierung mit den Kriterien Zentrierfähigkeit, Flächenpressungsoptimierung auf den Zahnflanken und Optimierung der Zahnfußspannung im Verbindungsbereich.

Die durchgeführten FE-Rechnungen zur Simulation des Umformprozesses konnten zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, durch Kaltumformung Zahnwellen und Zahnnaben mit dem Novikovprofil zu erzeugen. Die durchgeführten praktischen Versuche zeigten, dass eine Aluminiumnabe im Bereich der Zahnücke den hohen Belastungen oberhalb der Zugfestigkeit während des Umformprozesses für das Novikovprofil standhielt und keine Anrisse festzustellen waren, wohingegen beim Evolventenprofil sich Anrisse im Nabenfußbereich ausbildeten. Untersuchungen für die Welle zeigten eine deutliche Verbesserung des Fertigungsprozesses bei Aufteilung der Gesamtverformung in eine Vorverformung und eine Endverformung, dabei reicht eine recht geringe Vorumformung aus.

5 Literatur

- /1/ Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, 18. Auflage, 1995
- /2/ <http://www.zakgear.com/wn.html>
- /3/ Schmidt, M.: FE - Berechnungen zur Optimierung des Novikov - Zahnprofils bei Welle/Nabeverbindungen, Unveröffentlichte Studienarbeit, IMW, Juni 2005
- /4/ Bartsch, G.: Verzahnungsherstellung durch Kaltwalzen aus dem Vollen. Bericht zur 25. Arbeitstagung „Zahnrad- und Getriebeuntersuchungen“ Mai 1984, Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
- /5/ König, W.; Weck, M.; Bartsch, G.: Herstellung und Tragfähigkeit kaltgewalzter Geradstirnräder aus Vergütungsstahl. VDI-Z 127 (1985) Nr.13, S. 481-485
- /6/ GROB AG-Kaltwalzmaschinen: Leitfaden für das Verständnis und die Anwendung des GROB - Kaltwalzverfahrens zum Verzahnen von wellenartigen Werkstücken, 1998
- /7/ <http://www.ex-cell-o.de/EX-CELL-O/produkte.htm>