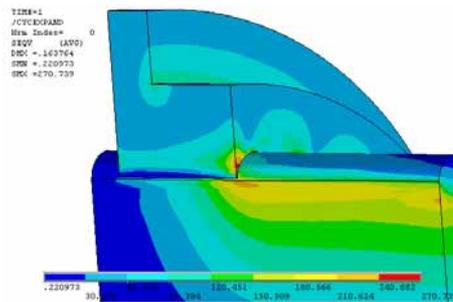


Leistungssteigerung von Zahnwellenverbindungen durch Neugestaltung des Zahnprofils

Dietz, P.; Wächter, M.

Numerische Untersuchungen an Zahnwellenverbindungen haben gezeigt, dass sich durch eine optimierte Zahnform nach dem Novikov-Grundprofil bei Drehmomentbelastung eine Beanspruchungsreduzierung im Zahnfuß auf 77% und bei der Flankenbeanspruchung auf 68% gegenüber einer Zahnwellengeometrie mit Evolventenflanken nach DIN 5480 bei gleichen Grundabmessungen erzielen lässt. Ferner ist eine Zentrierfähigkeitserhöhung festzustellen, die bei Auftreten von Querkräften zu vermindertem Verschleiß führt und die Lebensdauer der Verbindung erhöht. Die entwickelte Zahnform ermöglicht bei gleichem Bauraum höhere Leistungsdurchsätze und eröffnet Anwendungschancen in der gesamten Antriebstechnik.



Positive fit connections with circular arc type teeth are expected to have a larger tooth foot and tooth face load carrying capacity than involute and spline type tooth connections due to their convex - concave tooth geometry. By making use of the contact in the outer part of the flanks, a better centring behaviour than with the practically only flank centred use of involute tooth shapes is assumed. The basically more compact shape of teeth with circular arc shape should enable easier manufacturing by cold forming. Calculations with FE have shown an increase of load capacity of at least 30%, the radial stiffness under lateral forces is the double compared with involute splines.

1 Ausgangslage

Ausgangspunkt für die Untersuchungen von Wellen-Naben-Verbindungen nach dem Zahnwellenprinzip waren folgende Hypothesen:

Ausgangspunkt für die Untersuchungen von Wellen-Naben-Verbindungen nach dem Zahnwellenprinzip waren folgende Hypothesen:

- Kreisbogen-Verzahnungen lassen aufgrund ihrer konvex-konkaven Flankengeometrie gegenüber den Evolventen-

Verzahnungen eine erhöhte Zahnfuß- und Flankentragfähigkeit erwarten. Hierdurch ist eine Leistungssteigerung unter Beibehaltung der Hauptabmessungen der Verbindung möglich.

- Durch Ausnutzung des Kontakts in den weiter außen (und damit unter wesentlich größerem „Eingriffswinkel“) liegenden Flankenteilen wird ein verbessertes Zentrierverhalten gegenüber der praktisch nur flanken-zentriert eingesetzten Evolventen-Verzahnung angenommen. Damit können aufwendige Fremdzentrierungen oder die fragwürdigen Doppelzentrierungen in 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.

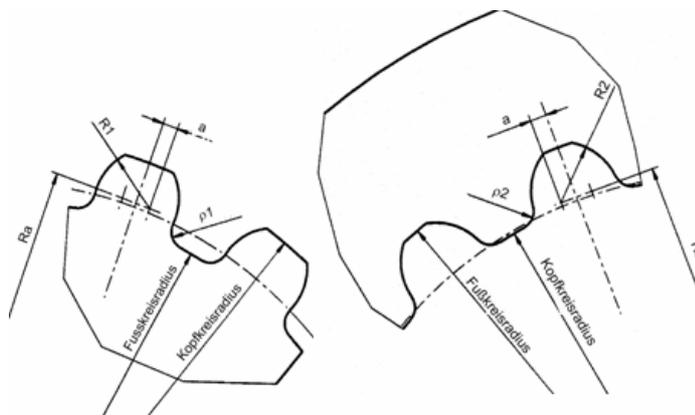


Bild 1: Novikov-Grundprofil, Bezeichnungen und Abmessungen

Abgeleitet aus dem Novikov-Grundprofil für Laufverzahnungen wird eine Optimierung der Zahngeometrie für Zahnwellenverbindungen mit den Kriterien Zentrierfähigkeit, Flächenpressungsoptimierung auf den Zahnflanken und Optimierung der Zahnfußspannung im Verbindungsbereich durchgeführt. Ausgehend von einer Verbindung mit Modul 3 mm und 18 Zähnen wurden die Parameter Zahnkrümmung R_1 und R_2 , Lage der Kreisbögen a und R_a , Zahnfußausrundung ρ_1 und ρ_2 , Modul m und Zähnezahl z variiert. **Bild 1** zeigt am Novikov-Grundprofil die verwendeten Bezeichnungen. Die Simulationen erfolgten durch 2D und 3D-Modelle mit dem Programmsystem ANSYS.

Es konnte eine optimale Geometrie für Drehmomentübertragung gefunden werden, mit dieser Geometrie wurden auch Belastung aus reiner Querkraft und Mischbelastungen simuliert. Alle Rechnungen wurden mit elastischem und elasto-plastischem Werkstoffverhalten durchgeführt.

2 Beanspruchungen unter Torsion

Bild 2 zeigt den grundsätzlichen Unterschied der Beanspruchungshöhe und -verteilung an zwei vergleichbaren Verbindungen unter gleichen Lasten.

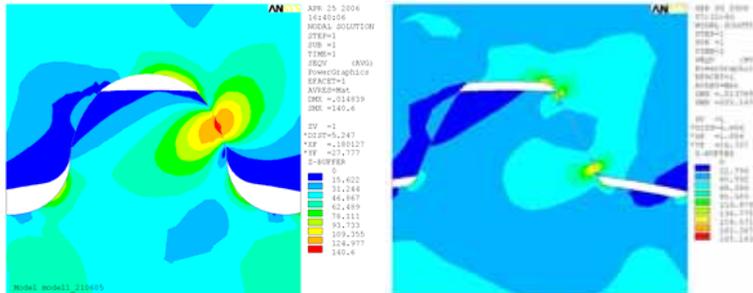


Bild 2: Vergleichsspannung nach von Mises für Drehmomentbelastung 800 Nm, 42CrMo4 rein elastisches Werkstoffverhalten, Modul $m = 3$ mm, Zähnezahl 18. Links: Kreisbogenverzahnung mit Nabenfußausrundungsradius 2,73 mm und Wellenfußausrundungsradius 2 mm; Rechts: Evolventenzahnform DIN 5480

Die Flankenbeanspruchung beim Evolventenprofil weist Beanspruchungsmaxima am Flankenkopf und -fuß auf, die zwar örtlich begrenzt sind, aber mit 205 N/mm^2 um 50 % über der Flankenbelastung der Kreisbogenverzahnung liegen. Die Beanspruchung der Kreisbogenverzahnung lässt sich beeinflussen durch die Krümmungsradien der Zähne und ihre Lage – es zeigt sich ein Optimum bei einer „positiven Profilverschiebung“ von ca. 0,08 und bei einem Verhältnis von Modul zu Flankenkrümmungsradius von 1,25.

Die Spannungsspitze im Naben Zahnfuß ist beim Evolventenprofil ausgeprägter als beim optimierten Kreisbogenprofil. Im Wellenzahnfuß auf der Zugseite lässt sich bei der Kreisbogeengeometrie eine Spannungsreduzierung auf 77 % der Evolventenbeanspruchung feststellen. Dies ist im Wesentlichen auf eine optimierte Ausrundungsgeometrie im Zahnfuß gegenüber der genormten Evolventengeometrie zurückzuführen, die in der Verringerung des Wellenquerschnitts ihre Grenze findet (Bild 2 links).

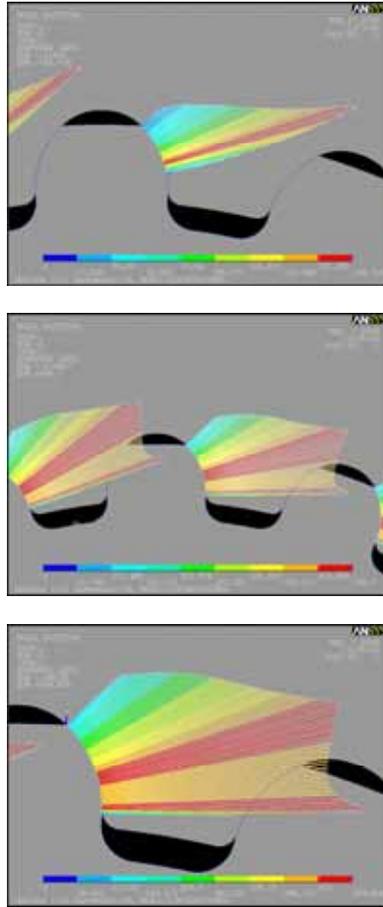


Bild 3: Kontaktdruckverlauf, Zahnform A (R_2 (Nabe)/ R_1 (Welle) = 1,015), 42CrMo 4 ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten. a) Drehmoment 800 Nm; b) Drehmoment 4800 Nm; c) Drehmoment 5300 Nm

Auch Ort und Verlauf der Beanspruchungen unterscheiden sich beträchtlich. Während unter reiner Drehmomentbelastung sich bei der Evolventenverzahnung die Maxima der Flächenpressung mit hohen Gradienten auf den Bereich um die Zahnköpfe konzentrieren (Bild 2 rechts), liegt das Maximum der Flankenpressung bei der Kreisbogenverzahnung etwa in Flankenmitte und weist aufgrund der verhältnismäßig großen Berührungszone mäßigere Gradienten auf. Bei Vergrößerung des Drehmoments wirken sich die Flankenbelastungen nur im unteren Bereich des Zahnes aus – die Zahnköpfe können damit entsprechend der in der Ausgangslage beschriebenen Aufgabenverteilung unbeeinflusst von der Belastungshöhe sich der Zentrierung der Verzahnung widmen. Die Flankenbelastung, die für die Übertragungsfähigkeit ebenso wie für den Verschleiß von hoher Bedeutung ist, wird im Folgenden in einer Detailbetrachtung näher erläutert: Es werden zwei Flankenformen untersucht – Form A hat ein Verhältnis Nabenkrümmungsradius R_2 zu Wellenkrümmungsradius R_1 von 1.015, Zahnform B von 1,1 und damit grundsätzlich eine kleinere

Kontaktfläche. Bei beiden Zahnformen bildet sich an Zahnfuß und Zahnkopf ein Spalt aus, der Hauptkontaktbereich liegt in Zahnmitte.

Bild 3 und **Bild 4** zeigen die Kontaktdruckverläufe der beiden Geometrien bei jeweils unterschiedlichen Belastungen.

Zahnform A zeigt bei niedriger Belastung (800 Nm, Bild 3a) eine Beanspruchung ausschließlich im Kopfbereich, der Verlauf ähnelt einer

zum Zahnfuß hin verschobenen Parabel. Bei höherer Belastung baut sich der Kontaktdruck in Richtung Zahnfuß auf, da die Zähne sich unter der Last durchbiegen, der Kontaktdruck am Zahnkopf der Welle hat sich damit nicht wesentlich verändert. Bild 3b zeigt den Verlauf bei 6-

facher Belastung gegenüber Bild 3a (4800 Nm), die Beanspruchungen befinden sich gerade noch im elastischen Bereich. Bild 3c stellt den Fall der überelastischen Beanspruchung dar, durch die Verformung der Wellenzähne erhöht sich der Kontaktdruck am Nabenzahnkopf erheblich.

Bei der Zahnform B ergeben sich deutlich andere Kontaktverteilungen. Unter niedriger Last werden Zahnkopf und Zahnfuß nicht belastet, es zeigt sich aber ein starker Druckanstieg an der fußseitigen Kontaktzone. Der maximale Druck ist deutlich höher als bei Zahnform A. Diese Verteilung ändert sich grundsätz-

lich nicht, selbst bei der höchsten Last wird der Hauptanteil der Belastung vom Fuß getragen.

Schlussfolgerung dieser Betrachtung ist, dass Zahnform A für die Flankenbeanspruchung und für die Aufgabe der Zentrierung geeigneter ist. Die Empfindlichkeit der Lastverteilung von der Krümmungsdifferenz im Hertz'schen Kontakt deutet aber darauf hin, dass diese Verzahnungsform hohe Ansprüche an die Fertigungsgenauigkeit stellt.

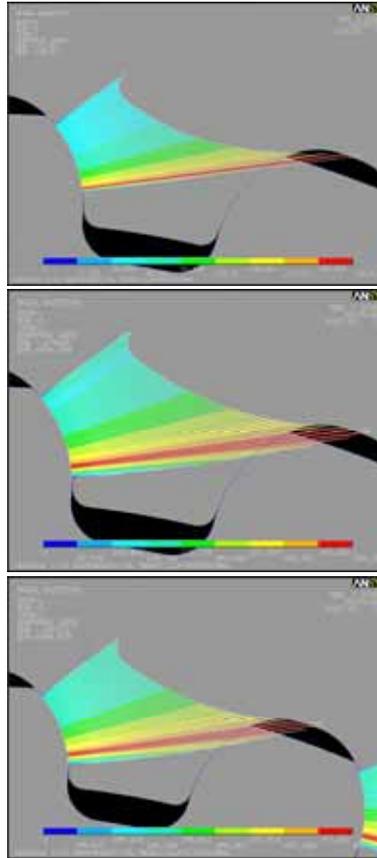


Bild 4: Kontaktdruckverlauf, Zahnform B (R_2 (Nabe)/ R_1 (Welle) = 1,1), 42CrMo 4 ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten. a) Drehmoment 800 Nm; b) Drehmoment 4800 Nm; c) Drehmoment 5300 Nm

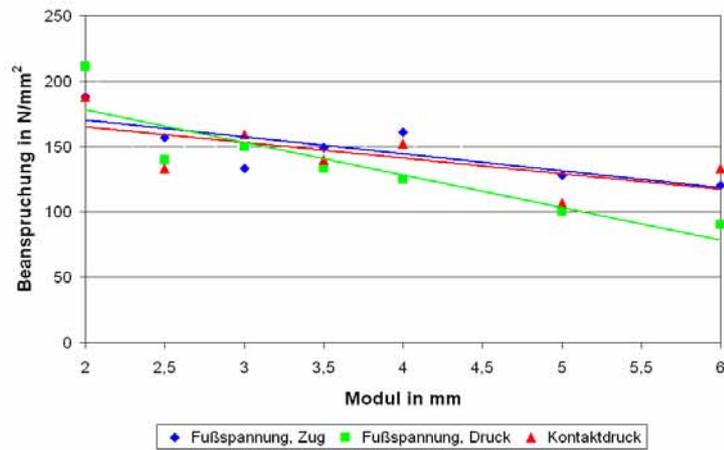


Bild 5: Zahnfußvergleichsspannungen und Flankenkontaktspannung in Abhängigkeit von Modul und Zähnezahl, Drehmoment 800 Nm, Bezugsdurchmesser 54 mm, 42CrMo4 rein elastisches Werkstoffverhalten

Die Zahnfußbeanspruchungen sind im Wesentlichen durch die Zahnfußausrundungen bestimmt. Während in Bild 2 rechts bei einem genormten Zahnfuß-Ausrundungsradius von $\rho = 0,25$ m sich scharfe Spannungsspitzen auf der Zugseite bemerkbar machen, finden sich bei der Kreisbogenverzahnung und einer Zahnfußausrundung von $\rho = 0,66$ m die wesentlich geringeren Spannungsspitzen auf der Druckseite – diese Lage bleibt auch bei Veränderung der Fußausrundungen bestehen und ändert sich nur mit Veränderung der Zahnformen bei Zähnezahlen kleiner 18 (Bild 5).

Parameterrechnungen mit Modul und Zähnezahl bei gleichem Durchmesser ergeben, dass sich im Gegensatz zur Evolventenverzahnung die Tragfähigkeit bei kleineren Zähnezahlen (und damit größeren Modulen) erhöht. Dabei fällt das Maximum der Zahnfußspannungen auf der Druckseite der Zähne stärker ab als auf der Zugseite, bei größeren Moduln wird die Zugseite etwas stärker belastet (Bild 5). Die gezeigten grundsätzlichen Ergebnisse und Tendenzen können durch räumliche FE-Rechnungen bestätigt werden. Dabei bewirkt zum Einen die Torsionsverformung der im Allgemeinen nachgiebigeren Welle eine Beanspruchungsverteilung im Zahnfuß, die der oben beschriebenen Tendenz entgegenwirkt, zum Andern gehen große Moduln und große Ausrundungsradien der Wellen zu Lasten der Torsionsbeanspruchungen.

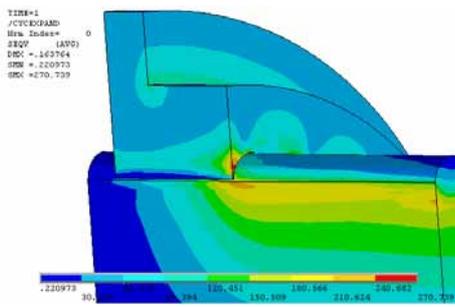


Bild 6: Vergleichsspannung nach von Mises für Drehmomentbelastung 6400 Nm, Streckgrenze 250 N/mm² ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten, Modul 3 mm, Zähnezahl 18, Verbindungslänge 50 mm

Räumliche Untersuchungen zeigen auch das übliche Bild der Spannungsüberhöhung an der Nabenkante, wobei die Zahnfußspannungen der Welle die kritischen Beanspruchungen darstellen. Mögliche Verbesserungen durch größere Ausrundungen im Zahnfuß nach den in den 2D-Rechnungen ermittelten Werten werden bestätigt. **Bild 6** stellt das belastete Modell dar, in **Bild 7** werden die Vergleichsspannungen im Nabenfuß über der Verbindungslänge gezeigt. Die Rechnungen wurden dabei mit elastisch-plastischem Werkstoffverhalten durchgeführt.

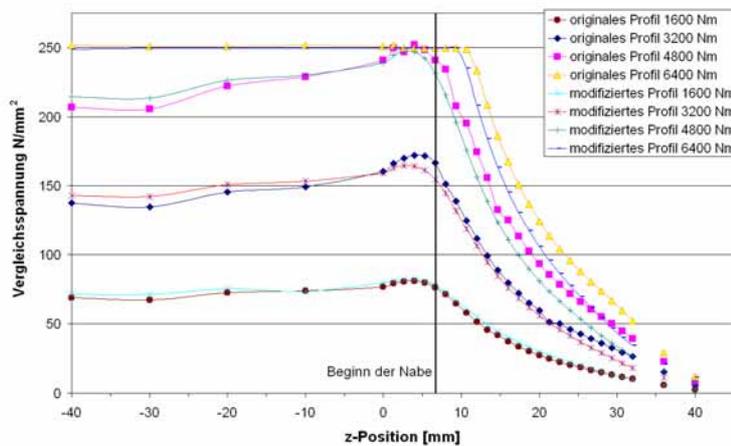


Bild 7: Vergleichsspannung nach von Mises über der Nabenlänge, Streckgrenze 250 N/mm² ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten, Modul $m = 3$ mm, Zähnezahl 18, Verbindungslänge 50 mm. „originales Profil“ hat Zahnfußausrundungsradius $\rho_1 = 1,13$ mm, „modifiziertes Profil“ hat $\rho_1 = 2$ mm

3 Beanspruchungsverteilungen unter gemischter Belastung, Zentrierfähigkeit und Verschleißverhalten

Maßgebend für das Verhalten unter gemischter Belastung aus Drehmoment und Querkraft sind die Lastaufteilungen auf die einzelnen Zahnpaare und die durch das Spiel bedingten Reibungswege während eines Umlaufs.

Um das Zentrierungs- und Querkraftübertragungsverhalten beurteilen zu können, wird die Form A der fehlerfreien Bezugsverzahnung ohne Zahnspiel und ohne Drehmomenteinleitung mit Querkraften belastet.

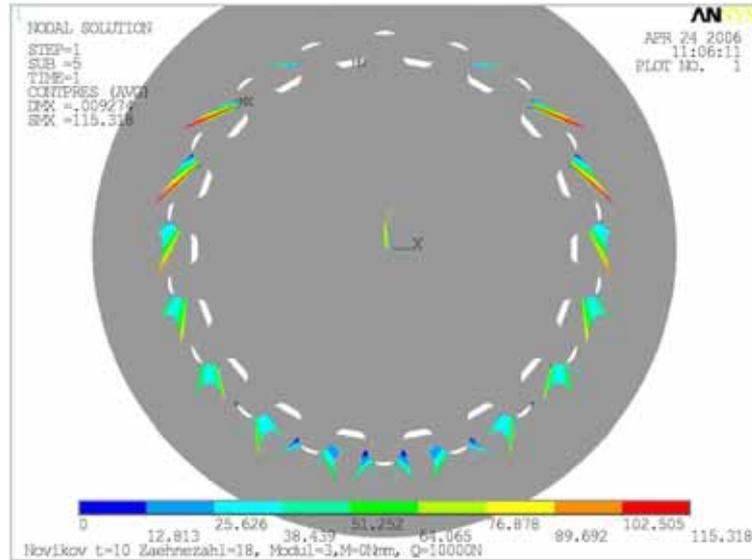


Bild 8: Kontaktdruckverteilung unter Querkraft 10 kN, Modul 3mm, Zahnanzahl 18, Zahnform A, 42CrMo4 ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten

Bild 8 zeigt die Kontaktdruckverteilung unter einer Querkraftlast von 10kN. Die Belastung aller Zähne ist achsensymmetrisch um die Senkrechte. Die maximalen Kontaktdrücke entstehen an der Zwei-Uhr-Position, der dritte Zahn von der Senkrechten aus weist trotz des höchsten Drucks den schmalsten Kontaktbereich auf, hier ist die Druckverteilung einer spitzen Parabel sehr ähnlich. An den Zahnköpfen der drei untersten Zähne ist auf beiden Seiten ein Kontakt vorhanden, welcher aber relativ gering ausfällt. Generell variieren die Tragbilder stark und ähneln nicht mehr den Beanspruchungsverläu-

fen unter reiner Drehmomentbelastung. Eine Erhöhung der Querkraft beeinflusst die Kontaktdruckverteilung nur geringfügig.

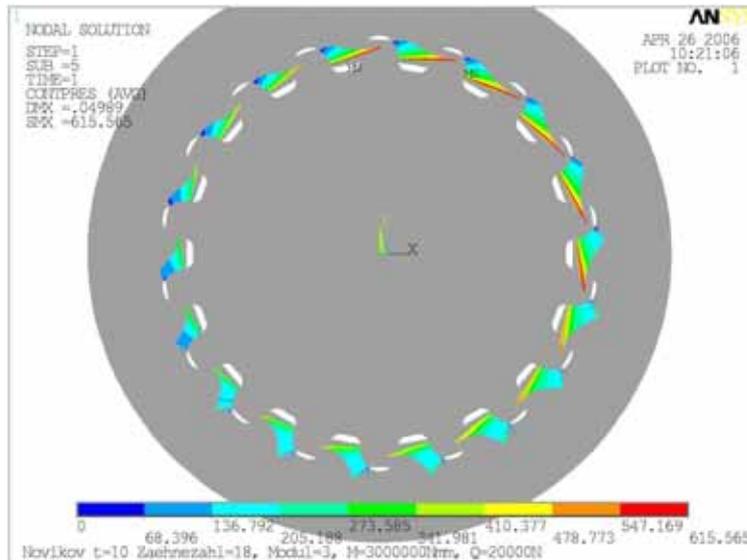


Bild 9: Kontaktdruckverteilung unter kombinierter Belastung mit 3000 Nm Drehmoment und 20 kN Querkraft, Modul 3mm, Zähnezahl 18, Zahnform A, 42CrMo4 ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten

Die Untersuchung der Zahnwellenverbindungen unter dem kombinierten Einfluss von Querkraft und Drehmoment wurden für die Form A der Referenzverzahnung bei einem Drehmoment von 3000 Nm und einer Querkraft in drei Stufen von 10, 20 und 25 kN durchgeführt.

Die Kontaktdruckverteilung ist um den Umfang sehr gleichmäßig, das Tragbild ist an allen Zähnen ähnlich in Form und Größe (**Bild 9**). Es findet auch in dieser Lastkombination eine Verschiebung der Nabe gegenüber der Welle statt. Dies ist durch ein leichtes Eindringen der Zahnköpfe in die Nabe an der Unterseite der Verbindung zu erkennen.

Die in Bild 9 gezeigte Belastung entspricht bei einer Zahnwellenverbindung DIN 5480 der Kombination von Drehmoment und Querkraft, bei der der Einfluss der Querkraft überwiegt und die Evolventenzähne an ihren der Last abgewandten Seiten Kontakt finden – dabei findet ein verstärkter Verschleiß statt. Im Gegensatz zur Evolventenverzahnung verbessert bei der Kreisbogenverzahnung bereits ein geringes Drehmoment die Aufnahmefähigkeit für Querkräfte. Eine Eigenschaft der Kreisbogenform besteht darin, unter tangentialer Belastung eines Zahns eine radial nach innen gerichtete Kraft zu erzeugen,

welche die Querkraft teilweise ausgleicht. Daraus folgt direkt ein stark verminderter Einfluss der Querkraft auf die Verbindung, wenn gleichzeitig Drehmoment anliegt. Im Sinne einer Aufgabenteilung übernehmen damit fußseitige Bereiche der Zähne mit kleinem Eingriffswinkel die Aufgabe der Drehmomentübertragung, die Köpfe der Zähne mit großem Eingriffswinkel nehmen die Querkräfte auf und sorgen für die Zentrierung.

Ein Vergleich der Beanspruchungen bei elastisch-plastischer Rechnung mit einer Mischbelastung aus 3000 Nm Drehmoment und 20 kN Querkraft in der Verbindung mit Kreisbogenprofil und in einer Verbindung mit Evolventenflanke nach DIN 5480 zeigt, dass bei der Evolvente der Kontaktdruck um 38 % höher und die Vergleichsspannung im Zahnfuß um 30 % höher ausfällt. Durch die Vergrößerung der die Last übertragenden Fläche bei der Kreisbogenverzahnung ergibt sich eine Reduzierung der Beanspruchungen in einer beeindruckenden Größenordnung.

Die Verschiebungen im Bereich der Verzahnung, speziell der Unterschied zwischen den Verschiebungen der Nabenzähne zu den Verschiebungen der Wellenzähne fallen bei der Kreisbogenverzahnung geringer aus, es gibt geringere Gesamt-Relativverschiebungen und somit eine geringere Verschleißneigung. Diese Aussagen sind allerdings zu relativieren, da die für die Berechnung verwendeten Zahnformen weder Spiel noch Fertigungsabweichungen aufweisen.

Die bisherigen numerischen Untersuchungen lassen eine erhebliche Leistungssteigerung von Zahnwellen mit einem Kreisbogenprofil gegenüber den standardisierten Verbindungen nach DIN 5480 erwarten. Es ist geplant die Untersuchungen an ausgeführten Verzahnungen hinsichtlich der statischen und dynamischen Tragfähigkeit unter Drehmomentbelastung und hinsichtlich des Verschleißverhaltens unter kombinierter Belastung und unter dem Einfluss von Flankenspiel und Fertigungstoleranzen fortzusetzen. Dies beinhaltet auch die Entwicklung der spanlosen Fertigung solcher Verbindungen, die sich in Vorversuchen als machbar erwiesen hat.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei an dieser Stelle für die Unterstützung des Forschungsvorhabens gedankt.