

## Experimentelle Untersuchung von Zahnwellenprofilen unter Torsionsbelastung

Mörz, F.; Schäfer, G.

*Im Rahmen des FVA Forschungsprojektes 742: Zahnwellenprofiloptimierung (IGF-Vorhaben Nr. 18406 BG) wurden am Institut für Maschinenwesen umfangreiche numerische und experimentelle Untersuchungen von Zahnwellenprofilen durchgeführt. Der nachfolgende Artikel soll einen kleinen Einblick in die experimentellen Untersuchungen geben.*

*In the context of the FVA research project 742: spline shaft profile optimisation (IGF-No 18406 BG) extensive numerical and experimental researches of spline shaft profiles were done at the institute of mechanical engineering. The following article is meant to provide an inside of the experimental studies that were made.*



### Einleitung

Die Zahnwellenforschung am IMW beschäftigt sich gegenwärtig mit der Tragfähigkeitsoptimierung von Zahnwellenverbindung nach DIN 5480 /2/ im Rahmen der vorhandenen Norm. Außerdem wurden die so optimierten Evolventen-Profile einem neuartigen Zahnwellenprofiltyp, der komplexen Trochoide /6/; gegenübergestellt. Zu diesem Zweck wurden in Kooperation mit der westsächsischen Hochschule Zwickau unter Leitung der zuständigen FVA-Arbeitsgruppe zunächst die beiden Profiltypen unabhängig voneinander numerisch optimiert. Anhand der so ermittelten optimierten Profile wurden anschließend Prüfteile gefertigt, siehe dazu auch den Beitrag „Fräsen vs. Erodieren – Schwingfestigkeitseinfluss“, und experimentell untersucht. Der Fokus dieses Artikels soll auf den Untersuchungen zur statischen und dynamischen Torsionsbelastung der optimierten Zahnwellenprofile liegen. Die für die Bauteilversuche ausgewählten optimierten Profile auf Basis einer Welle mit 25 mm Durchmesser und deren polare Widerstandsmomente auf Basis der einbeschriebenen Kerndurchmesser sind in Abbildung 1 dargestellt.

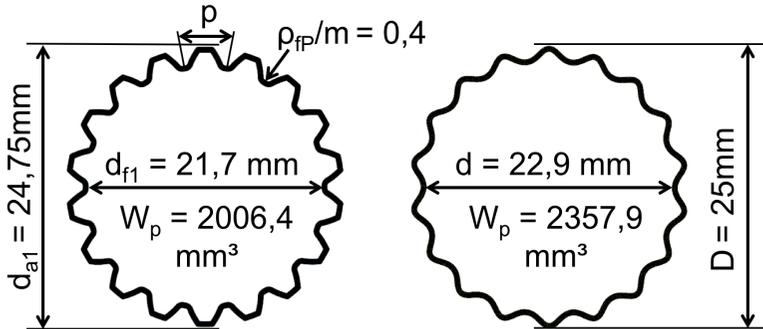


Abbildung 1: Im Rahmen des Forschungsprojektes FVA 742 optimierte Profile:  
links: Zahnwelle nach DIN 5480-25x1,25x18 mit  $\rho_{FP}/m = 0,4$   
rechts: Trochoide M-T046  $z = 18 / 4$

## Probenfertigung

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden, um maximale Flexibilität bei der Fertigung der Konturen zu gewährleisten, das Erodieren-Verfahren für die Fertigung der optimierten Konturen definiert. Mit dem zunächst angewendeten Senk-Erodier-Verfahren für die optimierte Trochoiden-Kontur ließ sich die geforderte Konturgenauigkeit jedoch nicht in der gewünschten Qualität  $IT_6$ ,  $R_z < 6 \mu\text{m}$  in sinnvoller Fertigungszeit einstellen. Aufgrund dessen wurden im Folgenden die Proben mittels Drahterodieren hergestellt. Die Wellen müssen dazu zweiteilig aufgebaut werden. Sie bestehen aus einer Welle die nur über das Profil verfügt und einem Wellenstumpf mit Innenprofil, der mit einer Übermaßpassung mit der Profil-Welle gefügt ist (vgl. Abbildung 2). Das Profil in den zugehörigen Naben ist ebenfalls mittels Drahterodier-Verfahren als Schiebesitz hergestellt.



Abbildung 2: Gebaute Welle, bestehend aus Wellenstumpf (rechts) und der damit gefügten Profil-Welle

## Experimentelle Untersuchungen

In Vorbereitung auf die Versuche wurden an den Proben umfangreiche Messungen zur Bestimmung der Oberflächenqualitäten, des Knickspieles (Maß für die Passungsgüte von Zahnwellenverbindungen, vgl. FVA 505 /3/) und der Verifikation der Konturgenauigkeit durchgeführt. Alle nachfolgend dargestellten Spannungen und Formzahlen sind für einen direkten Vergleich der Profile auf den Nennaußendurchmesser der Profile von 25 mm bezogen (Anmerkung: Für Zahnwellen wird normalerweise nach DIN 5466-1 /1/ der Ersatzdurchmesser  $d_{h1} < d_B$  verwendet).

## Statische Torsionsuntersuchungen

Zunächst wurden je drei statische Torsionsversuche mit den beiden optimierten Profiltypen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Verläufe der einzelnen Versuche decken sich für den jeweiligen Profiltyp sehr gut. Anhand der Versuche wird ein Vorteil des hier untersuchten Trochoiden-Profiles gegenüber dem hier untersuchten evolventischen Profil von etwa 25 % deutlich. In diesem Kontext sind die in Abbildung 1 angegebenen polaren Widerstandsmomente mit einer Differenz von 17,5 % zu berücksichtigen. Die aus den Versuchen ermittelten maximalen übertragbaren Drehmomente bzw. ertragbaren Torsionsspannungen bis zum Beginn der plastischen Verformung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

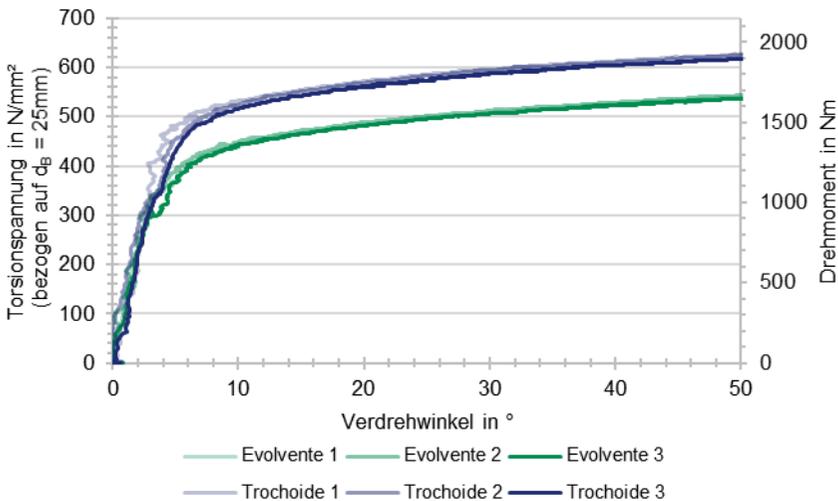


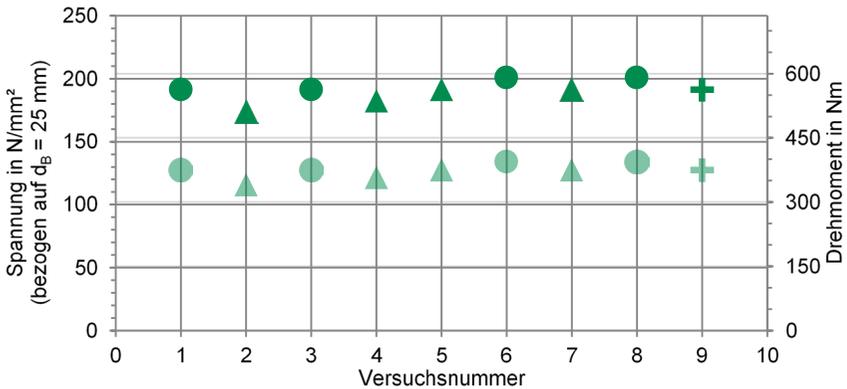
Abbildung 3: Gegenüberstellung der Ergebnisse, der statischen Torsionsuntersuchungen /1/

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den statischen Torsionsuntersuchungen drahterodierter Proben

Profiltyp	DIN5480-25x1,25x18, $\rho_{FP}/m = 0,4$	M-T046_z18
Torsionsspannung in N/mm <sup>2</sup> bei Beginn der plast. Verformung	385	483
Drehmoment in Nm bei Beginn der plast. Verformung	1180	1480

### Dynamische Torsionsuntersuchungen

Die Versuche zur dynamischen Torsion wurden auf Unwuchtmasse-Prüfständen durchgeführt. Es wurden Treppenstufenversuche nach Hück durchgeführt und nach der IABG-Methode ausgewertet. Diese Vorgehensweise ist identisch mit der in einem früheren Projekt /5/ genutzten Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 mit  $d_B = 25$  mm.



▲ Durchläufer	● Bruch	+ Fiktiver Versuch
(Nenn-)Torsionsmittelspannung / Mittellast		(Nenn-)Torsionsamplitudenspannung / Lastamplitude

Abbildung 4: Ergebnisse der dynamischen Torsionsuntersuchungen mit evolventischer Kontur ( $\rho_{FP}/m = 0,4$ ) und gefrästen Proben /4/

Abbildung 4 zeigt die gesamten Ergebnisse der Dauerfestigkeitsversuche zu den gefrästen evolventischen Proben mit einem modifizierten Fußrundungsradius von  $\rho_{FP}/m = 0,4$ . Die Auswertung dieser Versuche ergibt ein dauerfest ertragbares Drehmoment von  $T = 591 \pm 394$  Nm. Die daraus berechnete Kerbwirkungszahl

bezogen auf den Wellennendurchmesser von 25 mm beträgt 2,55 (siehe Tabelle 2). Vergleicht man diesen Wert mit der im Projekt /5/ ermittelten Kerbwirkungszahl der gefrästen Probe mit dem nach Norm (DIN 5480-1) ausgeführten Fußrundungsradius von  $\rho_{fp}/m = 0,16$  in der vierten Spalte von Tabelle 2 von 3,04, so wird der erhebliche Vorteil der vergrößerten Fußausrundung sehr deutlich. Die vergrößerte Fußausrundung reduziert bei gleichem Fertigungsverfahren die versagungskritischen Zahnfußspannungen um ca. 25 %.

Während die zunächst untersuchten optimierten Evolventen gefräste Proben waren, wurden für die optimierten Trochoiden, mittels Draht-Erodier-Verfahren hergestellt Proben verwendet. Die damit ermittelte Dauerfestigkeit ist in Abbildung 5 dargestellt.

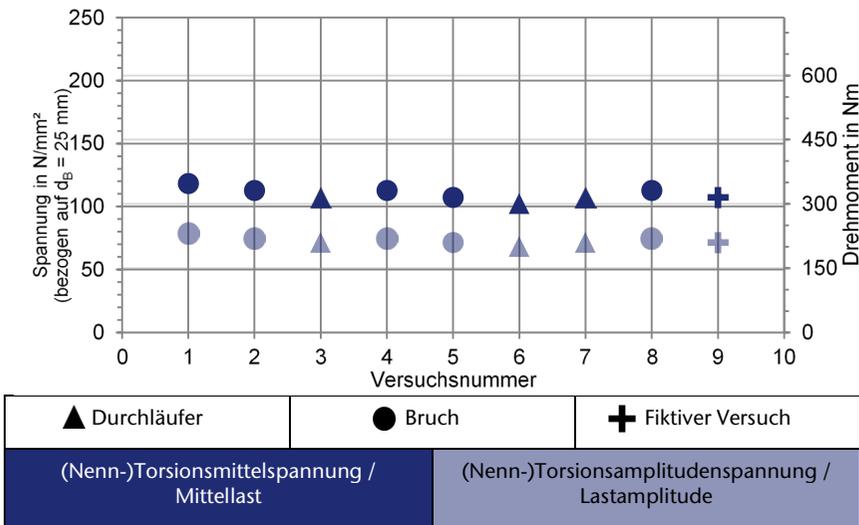
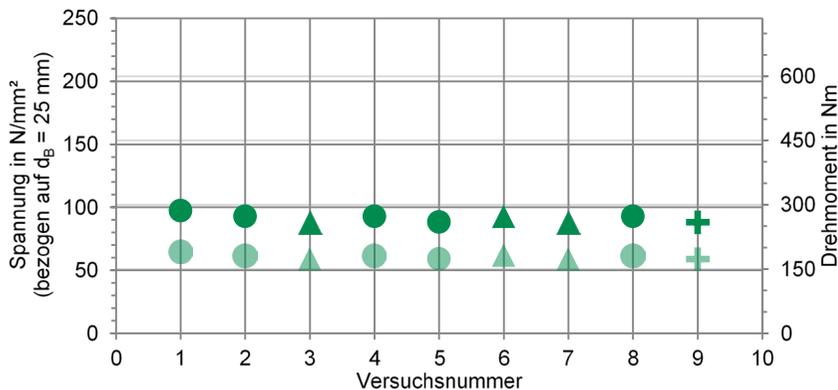


Abbildung 5: Ergebnisse der dynamischen Torsionsuntersuchungen mit Trochoiden-Kontur und erodierten Proben /4/

Es zeigte sich jedoch, dass die so ermittelten Kennwerte für die Tragfähigkeit ein unerwartet ungünstiges Ergebnis für die Trochoiden auswiesen, siehe auch erste und dritte Spalte in Tabelle 2.

Auf Basis der Erkenntnisse zum Einfluss der Fertigungsverfahren „Fräsen versus Erodieren“, wurden zusätzlich geometrisch identische evolventische Proben mit  $\rho_{fp}/m = 0,4$  mittels Drahterodieren hergestellt und deren Dauerfestigkeit und Kerbwirkungszahl ermittelt (vgl. Abbildung 6).



▲ Durchläufer	● Bruch	⊕ Fiktiver Versuch
(Nenn-)Torsionsmittelspannung / Mittellast		(Nenn-)Torsionsamplitudenspannung / Lastamplitude

Abbildung 6: Ergebnisse der dynamischen Torsionsuntersuchungen mit evolventischer Kontur und erodierten Proben /4/

Die Ergebnisse sind in der zweiten Spalte der Tabelle 2 zu finden. Aus dem Vergleich der zweiten und dritten Spalte in Tabelle 2 ist dann der doch positive Einfluss des weich verrundeten Trochoidenprofils zu erkennen.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den dynamischen Torsionsuntersuchungen /4/

	DIN5480- 25x1,25x18, $\rho_{TP}/m = 0,4$ gefräst	DIN5480- 25x1,25x18, $\rho_{TP}/m = 0,4$ erodiert	Opt. Trochoide M- T046 $z = 18$ erodiert	DIN5480- 25x1,75x18, $\rho_{TP}/m = 0,16$ gefräst
Mittellast in Nm	591	278	333	393
Lastamplitude in Nm	394	185	222	262
Kerbwirkungszahl für Torsion $\beta_\tau$ ( $d_B$ )	2,55	4,55	3,75	3,04

Um einen ersten Eindruck der Leistungsfähigkeit des Trochoidenprofils M-T046,  $z = 18$  /4/ bei gefräster Herstellung zu erhalten, wurde der Fertigungseinfluss aus den evolventischen Vergleichsreihen extrahiert und auf das Ergebnis der Trochoiden übertragen. Das Ergebnis dieser Umrechnung ist in Tabelle 3 in der zweiten Spalte als Abschätzung angegeben.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der auf fräsende Herstellung umgerechneten Ergebnisse aus den dynamischen Torsionsuntersuchungen /4/

	DIN5480-25x1,25x18, $\rho_{fp}/m = 0,4$ gefräst	ABSCHÄTZUNG: Opt. Trochoide M-T046 $z = 18$ gefräst
Mittellast in Nm	591	708
Lastamplitude in Nm	394	472
Kerbwirkungszahl für Torsion $\beta_{\tau}$ ( $d_b$ )	2,55	2,09

## Zusammenfassung

Die untersuchten Trochoidenprofile /4/ versprechen eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung gegenüber den in DIN 5480 als Standard angegebenen gefrästen Profilen mit  $\rho_{fp}/m = 0,16$ . Die DIN 5480 erlaubt aber auch bei Beibehaltung des wirtschaftlichen Fertigungsverfahrens Fräsen durch die Nutzung eines idealerweise auf  $\rho_{fp}/m = 0,48$  vergrößerten Fußrundungsradius eine um mindestens 20% gesteigerte Drehmomentkapazität bei vollständiger Geometrieompatibilität. Dies sollte bei einer Neubeschaffung eines Fräasers unbedingt beachtet werden.

## Literatur

- /1/ DIN 5466-1: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen – Teil 1: Grundlagen, Oktober 2000
- /2/ DIN 5480-1: Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser – Teil 1: Grundlagen, März 2006
- /3/ Lau, P.: Beanspruchungsgerechte Dimensionierung von Gelenkwellen mit Profilverschiebung (Längenausgleich), Forschungsvorhaben Nr. 505 I (FVA-Heft 1138), Frankfurt/Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2015
- /4/ Mörz, F.; Selzer, M.; Wild, J.: FVA 742 I, Optimierung des Zahnwellenprofils primär zur Drehmomentübertragung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Fertigungsmöglichkeiten, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 742 I (AiF 18406 BG), Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (in Vorbereitung)
- /5/ Wendler, J.; Wild, J.: Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen. Tragfähigkeit von Profilwellen (Zahnwellen-Verbindungen) unter typischen Einsatzbedingungen, FVA-Forschungsvorhaben Nr. 467 II, Frankfurt/Main, 2017 (FVA-Heft 1224)
- /6/ Ziaei, M., Selzer, M.: Entwicklung kontinuierlicher unrunder Innen- und Außenkonturen für formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen und Ermittlung analytischer Lösungsansätze, DFG-Zwischenbericht DFG ZI 1161