

Grundlegende Untersuchungen an Zahnwellen zur Kerbwirkungsermittlung



Lau, P.; Schäfer, G.

Für die beanspruchungsgerechte Auslegung von Wellen und Achsen kommt die DIN 743 /1/ zum Einsatz. Hier werden u. a. Kerbwirkungszahlen für ZWVen (Zahnwellenverbindungen) nach DIN 5480 /2/ genannt. Die Berechnungsergebnisse ließen sich in der Vergangenheit allerdings nicht immer mit den Erfahrungen aus der industriellen Praxis in Einklang bringen. Zur Beseitigung dieser Unstimmigkeiten hatte die FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.) ein Forschungsvorhaben mit dem Titel „Profilwellen-Kerbwirkung“ (FVA 4671) initiiert. In Zusammenarbeit mit dem IMM (Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion) der TU Dresden ist dieses Vorhaben vor kurzem erfolgreich abgeschlossen worden.

Calculating appropriate axles and camshafts with regard to the ruling loads designers usually employ the German standard DIN 743. Herein the user is able to find fatigue notch factors for spline shafts. But these factors did not always meet the experiences made in former practice. Aiming to eliminate this inconsistency the FVA, a German research organisation focussing on drive systems and components, had granted a research project labelled „Profilwellen-Kerbwirkung“ (FVA 4671). In cooperation with the IMM (Institute of Machine Elements and Machine Design) of the Technical University of Dresden this research project had been finished successfully a short time ago.

1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Hauptziele des Vorhabens bestanden in der Ermittlung verlässlicher Kerbwirkungszahlen und in der Beseitigung von Unsicherheiten hinsichtlich der Belastungsgrenzen bei statischer Belastung.

Hierfür wurden auf Dresdner Seite umfangreiche numerische Variationsrechnungen durchgeführt. Parallel fanden in Clausthal experimentelle Untersuchungen statt, die dazu dienten, die numerisch ermittelten Ergebnisse abzusichern. Als Gegenstand der experimentellen Untersuchungen wurde in Abstimmung mit den beteiligten Industriepartnern eine ZWV in der Größe 25x1,75x13 nach DIN 5480 festgelegt.

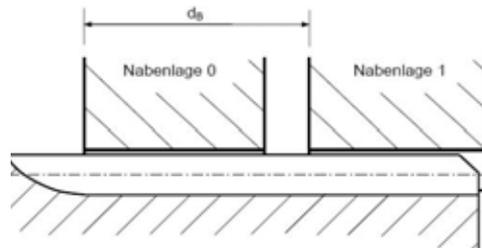
2 Untersuchte Einflussfaktoren

In den experimentellen Untersuchungen wurden verschiedene Einflüsse auf die Beanspruchbarkeit von ZWVen überprüft:

- die Auslaufgeometrie (gebundener Auslauf – freier Auslauf),
- das Vorhandensein einer Sicherungsringnut nach DIN 471/3/,
- der Fertigungseinfluss (umformend – spanend hergestellte Verzahnung),
- der Werkstoff (Vergütungsstahl – Einsatzstahl),
- die Belastungsart (Torsion – Biegung),
- der zeitliche Verlauf der Belastungen (statisch – dynamisch) und
- der Krafteinleitungspunkt (zwei verschiedene Nabenlagen), dazu siehe das nachfolgende **Bild 1**.

Bild 1:

Die beiden untersuchten Nabenlagen (NL 0 und NL 1) am Beispiel einer Zahnwelle mit gebundenem Auslauf



Zur Verbreiterung der Informationsgrundlage wurden außerdem weitere Untersuchungen und Messungen an den vorliegenden Prüfteilen angestellt. Sie dienten u. a. der Ermittlung bzw. Bestimmung der grundlegenden Werkstoffeigenschaften, der Werkstoffzusammensetzungen, der Gefüge, der Rauigkeiten, der Eigenspannungen und der Härte-Tiefe-Verläufe.

3 Versuchseinrichtungen

Bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen wurde der umfangreiche institutseigene Prüfstandsbestand genutzt. So fanden die statischen und dynamischen Torsionsuntersuchungen größtenteils auf einem servohydraulischen Prüfstand statt, der in der Lage ist sowohl hochdynamische, aber auch einfache statische Belastungen zu erzeugen. Die Umlaufbiegeuntersuchungen wurden auf einem ebenfalls bereits vorhandenen Umlaufbiegeprüfstand durchgeführt,

der im letzten Drittel der Versuchsphase Unterstützung durch einen baugleichen Neubau bekam. Allein für die Untersuchungen bei statischer Biegebelastung musste auf die Infrastruktur eines Nachbarinstituts zurückgegriffen werden.

4 Ausgeführte Prüfteile

Die nachfolgenden Bilder zeigen exemplarisch einige der experimentell untersuchten Prüflingsvarianten: in **Bild 2** lassen sich die untersuchten Auslaufgeometrien am Beispiel von Prüflingen mit spanend hergestellter Verzahnung erkennen; von links: freier Auslauf mit kleinen Radien, freier Auslauf mit vergrößerten Radien und gebundener Auslauf.

Bild 2:

Die unterschiedlichen Auslaufgeometrien: frei (Variante 1), frei (Variante 2) und gebunden



Bild 3 und 4 zeigen in vergleichender Darstellung Prüflinge mit spanend (links) und umformend (rechts) gefertigter Verzahnung.



Bild 3 und 4: Die unterschiedlich gefertigten Verzahnungen (am Beispiel von Prüflingen mit gebundenem Auslauf)

5 Experimentelle Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse einzelner Untersuchungen in Form von $T-\varphi$ -Verläufen (Drehmoment-Verdrehwinkel-Verläufen, stat. Torsion), F_Q-x -Verläufen (Querkraft-Weg-Verläufen, stat. Biegung) und Bauteil-Wöhlerlinien (dyn. Torsion und Biegung) wiedergegeben.

Anmerkung: Aufgrund des begrenzten Raums kann dieser Artikel leider nur einzelne Aspekte des Vorhabens behandeln.

5.1 Statische Torsionsbelastung

Allgemein ist unter diesem Punkt auffällig, dass die Streuung der Ergebnisse gering ausfällt. Die Zahnwellen aus beiden Werkstoffen zeigen einen kontinuierlichen Übergang vom elastischen zum elastisch-plastischen Werkstoffverhalten. Außerdem werden teilweise sehr große Verformungsgrade erreicht. So können bis zum letztendlichen (Torsions-)Bruch Verdrehwinkel von bis zu 110° erreicht werden.

Bild 5 zeigt mehrere $T-\varphi$ -Verläufe von Wellen mit gebundenem Auslauf. Der Unterschied zwischen den betrachteten Prüflingen besteht in den verschiedenen Werkstoffen und Fertigungsverfahren der Verzahnungen.

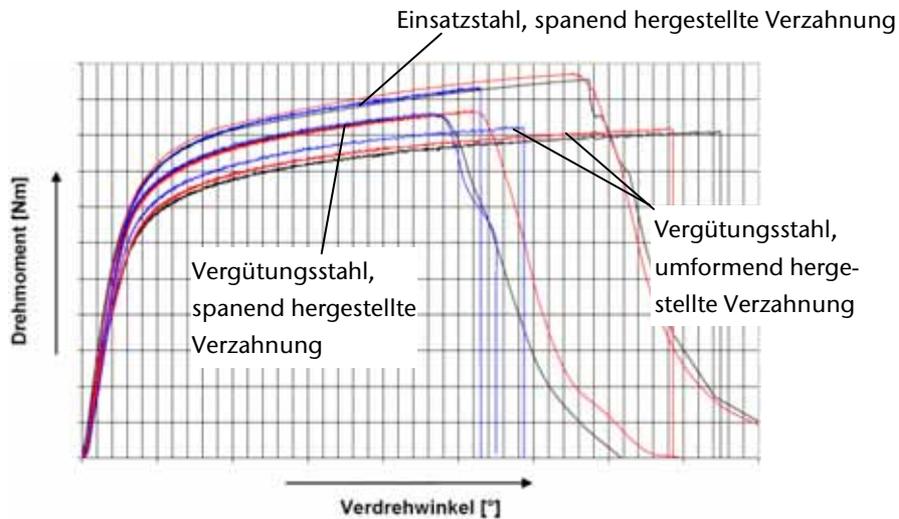


Bild 5: $T-\varphi$ -Verläufe bei statischer Torsion (drei Gruppen von jeweils drei Verläufen); mit werkstoff- und Fertigungsangaben; gemeinsame Parameter: gebundener Auslauf, NL 0

Liegen die Verläufe zu Beginn des elastischen Bereichs noch nah beieinander, fasn sie zu dessen Ende hin auf und lassen bei weiter wachsendem Verdrehwinkel zunehmend größere Unterschiede erkennen. So erreichen die Einsatzstahl-Zahnwellen, verglichen mit denen aus dem Vergütungsstahl durchweg die höheren Drehmomente bei gleichen Verdrehwinkeln und stellen sich als die steifere Variante heraus. Im Hinblick auf die Fertigungsverfahren der Verzahnung erreichen Zahnwellen mit spanend hergestellter Verzahnung höhere Drehmomentwerte bei gleichen Verdrehwinkeln.

5.2 Dynamische Torsionsbelastung

Die in diesem Bereich durchgeführten Untersuchungen fanden sämtlich bei schwellender Belastung und jeweils konstantem Spannungsverhältnis statt. Wie bei den Untersuchungsergebnissen zur statischen Torsion fällt die Streuung auch hier gering bis klein aus, was sich letztlich auch an den hohen Bestimmtheitsmaßen der Regressionsgeraden ablesen lässt, die allesamt Werte größer 0,77 erreichen.

Erwiesen sich die ZWen aus dem Einsatzstahl mit spanend hergestellter Verzahnung bei den statischen Torsions-Untersuchungen gegenüber den beiden anderen ZW-Varianten im Hinblick auf die erreichten Lasten noch als überlegen, ändert sich das Bild wenn man ihre Untersuchungsergebnisse bei dynamischer Torsionsbelastung vergleicht (Bild 6).

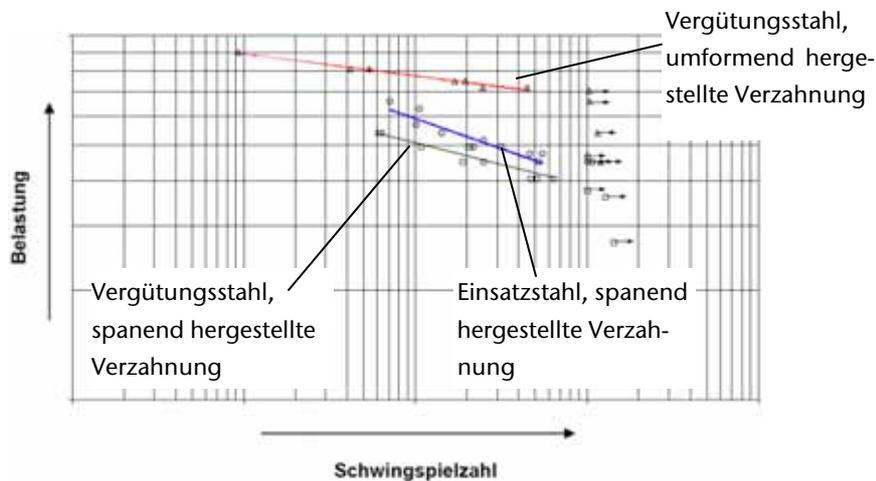


Bild 6: Bauteil-Wöhlerlinien bei dynamischer Torsion; mit Werkstoff- und Fertigungsangaben; gemeinsame Parameter: gebundener Auslauf, NL 0

Aus vorstehendem Bild, das die gleichen Zahnwellenvarianten wie Bild 5 vergleicht, geht hervor dass die ZWen aus dem Vergütungsstahl mit umformend hergestellter Verzahnung bei etwa gleichen Bruch-Schwingspielzahlen wesentlich höhere Lasten ertragen als ZWen, die eine spanend hergestellte Verzahnung aufweisen.

5.3 Statische Biegebelastung

Analog zu den Untersuchungsergebnissen bei statischer Torsionsbelastung liegen die Steigungen der Verläufe zu Beginn des elastischen Bereichs wiederum recht eng beieinander und lassen erst im weiteren Verlauf deutlicher werdende Unterschiede erkennen. Auch hier haben Werkstoff und Auslauform großen Einfluss auf die erreichten Lasthorizonte.

Zur Verdeutlichung zeigt **Bild 7** ermittelte F_Q - x -Verläufe, in denen diese beiden Einflüsse offenkundig werden: die Prüflinge aus dem Einsatzstahl erreichen durchweg die höheren Lastniveaus bei identischer Geometrie. Bei gleichem Material bewirkt ein freier Auslauf ein erkennbar früheres Abknicken des Verlaufs am Ende des elastischen Bereichs.

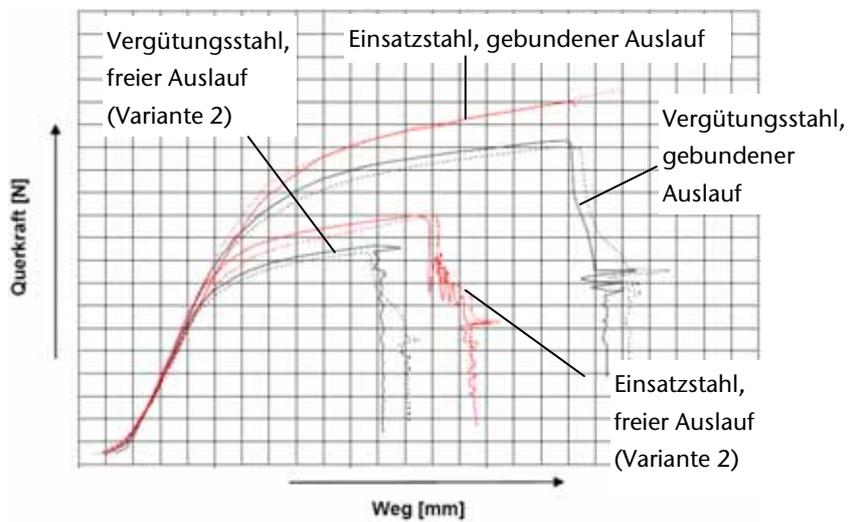


Bild 7: F_Q - x -Verläufe bei statischer Biegung (vier mal zwei Verläufe); mit Werkstoff- und Geometrieangaben; gemeinsame Parameter: spanend hergestellte Verzahnung, NL 0

5.4 Dynamische Biegebelastung

Verglichen mit den Ergebnissen aus den Untersuchungen bei dynamischer Torsion fällt auf, dass die Streuung bei den Ergebnissen der Umlaufbiegeuntersuchungen größer ist. Es traten hier vereinzelt Durchläufer bei Lastniveaus auf, auf denen mit einem Bruch im Zeitfestigkeitsbereich zu rechnen war.

Grundsätzlich ergibt sich bei den mit wechselnder Beanspruchung durchgeführten dynamischen Biegeuntersuchungen im Vergleich zu denen mit dynamischer Torsionsbelastung (Abschnitt 5.2) ein geändertes Bild: Wie in **Bild 8** ersichtlich, sind die ZWen mit freiem Auslauf bei dieser Beanspruchungsart denen mit gebundenem insbesondere im Bereich der Dauerfestigkeit überlegen. Zu größeren Lasten bzw. zu kleineren Schwingspielzahlen hin nähern sich die Zeitfestigkeitsgeraden allerdings an. In diesem Bild ist zusätzlich noch der geringfügig schwächende Einfluss der in Auslaufnähe vorhandenen Sicherungsringnut (SRN) zu erkennen.

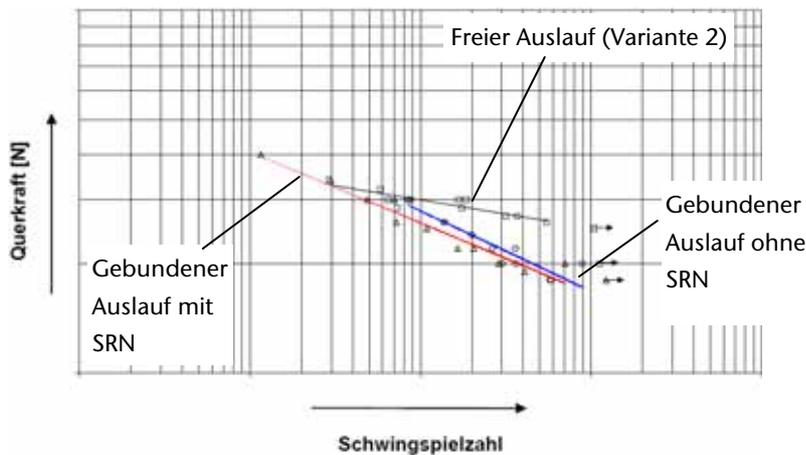


Bild 8: Bauteil-Wöhlerlinien bei dynamischer Biegung; mit Geometrieangaben; gemeinsame Parameter: Einsatzstahl, spanend hergestellte Verzahnung, NL 0

6 Anmerkung

Das vorgestellte Forschungsvorhaben (Projektnummer 14058 BG) wurde aus Mitteln der FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik) bzw. der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) finanziert. Genauere Untersuchungsergebnisse stehen Mitgliedsfirmen der FVA zur Verfügung.

7 Zusammenfassung

Im Zuge eines Forschungsvorhabens im Bereich der Welle-Nabe-Verbindungen fanden am IMW umfangreiche experimentelle Untersuchungen an ZWVen nach DIN 5480 statt. Durch die Zusammenführung der am IMW erarbeiteten Ergebnisse mit denen der ebenfalls beteiligten Dresdner Forschungsstelle konnten abschließend verlässliche Kerbwirkungszahlen und Grenzen für die statische Belastbarkeit ermittelt werden.

8 Literatur

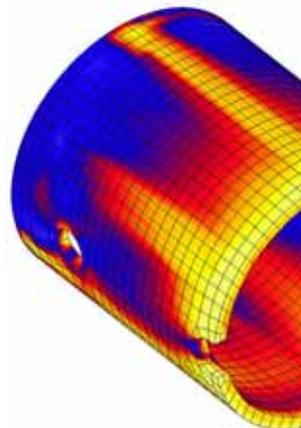
- /1/ DIN 743: Tragfähigkeitsnachweis von Achsen und Wellen. Beuth, Berlin, 2000
- /2/ DIN 5480: Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser. Beuth, Berlin, 2006
- /3/ DIN 471: Sicherungsringe für Wellen; Regelausführung und schwere Ausführung. Beuth, Berlin, 1981

Konstruktion
Berechnung
Simulation



Die ITNW Ingenieurtechnik NordWest GmbH ist ein unabhängiger Dienstleister für Konstruktions- und Berechnungstätigkeiten, Forschungs- und Entwicklungsaufgaben im Umfeld der Luft- und Raumfahrttechnik, des Automobilbaus und des Maschinenbaus.

Das Unternehmen ist in drei Bereiche gliedert, die ausgehend vom Produktkonzept, der Konstruktion, der Berechnung und Simulation über das Validieren im Lebensdauerversuch bis hin zur Fertigung technischer Produkte die gesamten Ingenieur Tätigkeiten der Produktentwicklung abdecken.



ITNW Ingenieurtechnik NordWest GmbH
Tel: +49 441 2050 960 • Fax: +49 441 2050 961
E-Mail: email@it-nw.de