

Grundlegende Untersuchungen an Zahnwellen zur Kerbwirkungsermittlung

Lau, P.

Zur Auslegung von Achsen und Wellen dient heute die DIN 743 /1/. Die darin enthaltenen Kerbwirkungszahlen für Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480 /2/ stehen teilweise im Widerspruch zu Erfahrungen und Beobachtungen aus der Praxis. Daraus ergibt sich der Bedarf einer Überprüfung, Präzisierung und Ergänzung. Diese Aufgabenstellung verfolgt das laufende FVA-Vorhaben 467 „Profilwellen-Kerbwirkung“, das vom IMW zusammen mit dem IMM (Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion) der TU Dresden bearbeitet wird.

At present the German standard DIN 743 is used for designing axles and shafts. It contains fatigue notch factors for spline shafts according to the German standard DIN 5480. But these factors partially conflict with practical experiences and studies. The outcome of this is the need for improvement in terms of examination, specification and completion. Exactly this is the intention of the ongoing research-project FVA 467 „Profilwellen-Kerbwirkung“ wherein the IMW works in close collaboration with the IMM (Institute of Machine Elements and Machine Design) of the Technical University of Dresden.

1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel des Vorhabens besteht darin, bestehende Unsicherheiten hinsichtlich der Belastungsgrenzen (Verformung, Anriss, Bruch) bei quasistatischer Belastung (Spitzenbelastung) auszuräumen und verlässliche Kerbwirkungszahlen sowie Betriebsfestigkeiten für die dynamische Beanspruchung zur Verfügung zu stellen. Um eine effektive Anwendung der Ergebnisse zu erreichen, sollen die neu gewonnenen Ergebnisse in DIN 743 "Tragfähigkeitsnachweis von Achsen und Wellen" eingebunden werden.

Die Aufgabenbereiche innerhalb des Vorhabens verteilen sich wie folgt: Während in Dresden die numerischen Variationsrechnungen durchgeführt werden, bei denen Clausthal in einem Teilbereich Zuarbeit leistet, erfolgt die experimentelle Absicherung an repräsentativen Verbindungsgeometrien am IMW in Clausthal. Gegenstand der experimen-

tellen Untersuchungen sind dabei Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480 – 25x1,75x13 9H/6g.

2 Untersuchte Merkmale

Die im Zuge der Untersuchungen an der genannten Verzahnung im Mittelpunkt stehenden Merkmalsvariationen sind:

- Werkstoffwahl (Vergütungsstahl – Einsatzstahl)
- Ausbildung der Profilwellenübergänge / Auslaufgeometrie (gebundener Auslauf – freier Auslauf)
- Fertigungsverfahren (spanend – spanlos hergestellte Verzahnung / geschliffene – gewalzte Verzahnung)
- Belastungsarten (Torsion – Biegung)
- Zeitlicher Verlauf der Belastungen (quasistatisch – dynamisch)

Neben der Variation dieser Merkmale finden zur Steigerung des Praxisbezugs weitere orientierende Untersuchungen statt. Sie betrachten die Auswirkung:

- des Vorhandenseins einer Sicherungsringnut in der Verzahnung (nach DIN 471 /3/) und
- einer veränderten „Nabenlage 1“ (statt der „Nabenlage 0“; dazu siehe **Bild 1**).

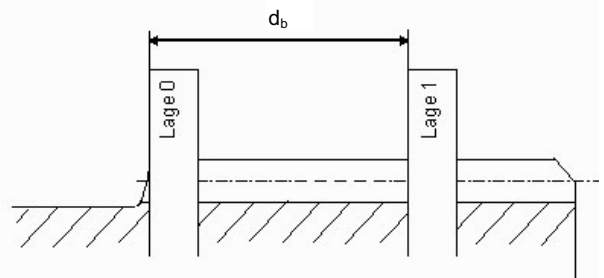


Bild 1 Die unterschiedlichen Nabenlagen am Beispiel eines Prüflings mit freiem Auslauf

Die systematische Untersuchung der Kombination der unterschiedlichen Merkmale soll verallgemeinerungsfähige Aussagen ermöglichen. Die Aufgaben des IMW beschränken sich allerdings nicht allein

auf die Durchführung von Untersuchungen bei quasistatischen und dynamischen Belastungen. Parallel erfolgen weitere Untersuchungen und Messungen, die der Verbesserung des Kenntnisstands über die vorliegenden Prüfteile hinsichtlich ihrer werkstoffkundlichen und fertigungsimmanenten Eigenschaften dienen:

- Bestimmung des Härte-Tiefe-Verlaufs,
- Zugversuche,
- Gefügeuntersuchungen,
- Eigenspannungsuntersuchungen und
- Rauigkeitsmessungen.

3 Prüfteile

Zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Auslaufgeometrien sowie des Unterschieds zwischen den verschiedenen gefertigten Verzahnungen sei auf **Bild 2** bis **Bild 5** verwiesen.

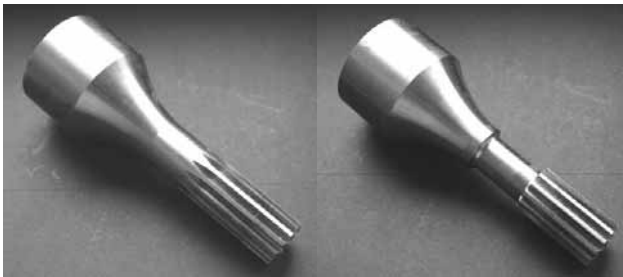


Bild 2 und 3: Beide Auslaufformen am Beispiel von Prüflingen mit geschliffener Verzahnung



Bild 4: Prüflinge mit gebundenem Auslauf und gewalzter (links) bzw. geschliffener Verzahnung (rechts)

Bild 5: Analog zu **Bild 4**; hier mit freiem Auslauf



Das für die Durchführung der einzelnen Untersuchungen benötigte Gegenstück bildet eine innen

verzahnte Nabe. Sie besteht ebenfalls aus dem für die Prüflinge verwendeten Vergütungsstahl. **Bild 6** stellt eine entsprechende Zahnwellenverbindung dar.



Bild 6 Prüfling und Nabe im gefügten Zustand

4 Experimentelle Untersuchungen

Die Prüflinge aus dem zweiten Werkstoff werden zurzeit gefertigt. Daher liegen momentan noch keine Ergebnisse aus den zugehörigen Untersuchungen an den Prüflingen aus dem Einsatzstahl vor.

4.1 Untersuchungen bei quasistatischer Belastung (Torsion)

Die in den nachfolgenden Diagrammen aufgeführten Drehmoment-Verdrehwinkel-Verläufe stellen nur einen Ausschnitt der gesamten Untersuchungsergebnisse dar. Die Diagramme geben in vergleichender Darstellung die Ergebnisse aus Untersuchungen an jeweils zwei Gruppen von Prüflingen wieder, die sich hinsichtlich eines Merkmals unterscheiden. Die Vergleiche sind dabei auf die Merkmalsvariationen beschränkt, die den größten Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben.

Bild 7 zeigt die Auswirkung der unterschiedlichen Auslaufformen am Beispiel von Prüflingen mit gewalzter Verzahnung und einer Nabenlage mitten in der Verzahnung. Die beiden oberen Verläufe gehören dabei zu Prüflingen mit gebundenem Auslauf. Klar erkennbar ist die deutlich höhere Streckgrenze und Festigkeit gegenüber der anderen Auslaufform. Wie bereits in diesem Diagramm ersichtlich, tritt bei den Untersuchungsergebnissen zur statischen Torsionsbelastung eine recht geringe Streuung auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Ausgangsmaterial für die Fertigung der Prüflinge aus einer Werkstoffcharge entnommen wurde. Weiterhin zeichnet sich der Vergütungsstahl durch eine sehr große Duktilität aus – dies führte dazu, dass bei Versuchen an Prüflingen mit gebundenem Auslauf Verdrehwinkel von über 100° erreicht wurden.

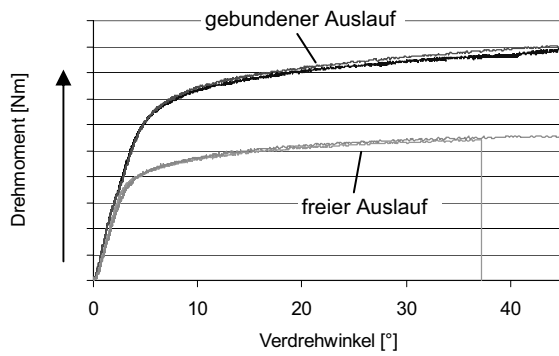


Bild 7: Drehmoment-Verdrehwinkel-Verläufe bei Prüflingen mit unterschiedlicher Auslaufform

Bild 8 zeigt die Auswirkungen der unterschiedlichen Fertigungsverfahren der Verzahnung bei Prüflingen mit gebundenem Auslauf und Nabenlage am Verzahnungsbeginn: Die markierten oberen drei Verläufe gehören zu Prüflingen mit geschliffener Verzahnung. Liegen sie im elastischen Bereich noch leicht über denen der Prüflinge mit gewalzter Verzahnung und erreichen auch geringfügig höhere Werte bei der Streckgrenze, so tritt ihr Bruch bei deutlich niedrigeren Verdrehwinkeln (kleiner 30°) auf.

Dazu ist anzumerken, dass die senkrechten Abfälle am rechten Ende einzelner Verläufe durch das Eingreifen der Prüfstands-Winkelabschaltung entstehen. Nach Lösen der Prüflingsbefestigung und Zurückdrehen der Prüfzelle konnten die zugehörigen Versuche jeweils fortgesetzt werden. Dabei erreichten die Prüflinge mit gewalzter Verzahnung genauso hohe Festigkeitswerte, im Vergleich zu den Prüflingen mit geschliffener Verzahnung.

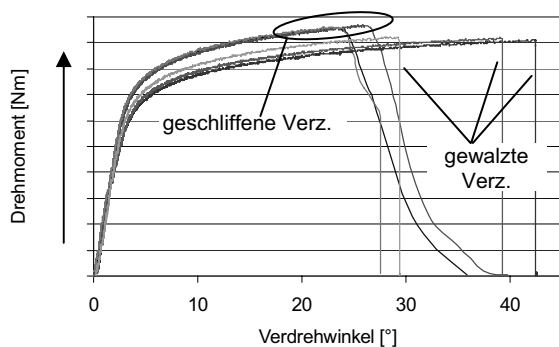


Bild 8: Drehmoment-Verdrehwinkel-Verläufe bei Prüflingen mit unterschiedlich gefertigter Verzahnung

In **Bild 9** wird die Auswirkung einer vorhandenen Sicherungsringnut ersichtlich. Die dargestellten Verläufe stammen aus Versuchen an Prüflingen mit geschliffener Verzahnung, gebundenem Auslauf

und bei Nabenlage 0, wobei die markierten Verläufe zu Prüflingen ohne Sicherungsringnut gehören.

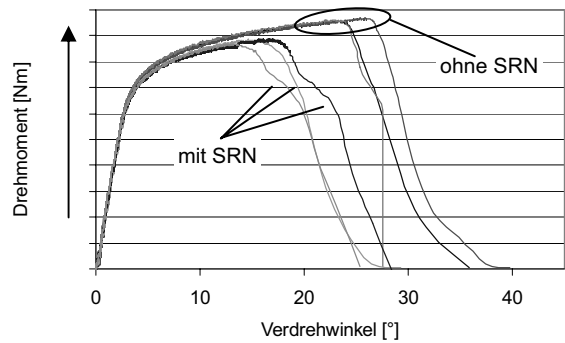


Bild 9: Drehmoment-Verdrehwinkel-Verläufe bei Prüflingen mit und ohne Sicherungsringnut

Aus der Betrachtung der Verläufe ergibt sich, dass bei Vorhandensein der Nut Streckgrenze, Festigkeit und maximale Verdrehwinkel zu kleineren Werten hin verschoben sind.

4.2 Untersuchungen bei quasistatischer Belastung (Biegung)

Für eine vergleichende Betrachtung der unterschiedlich ausgeführten Prüflinge bei dieser Belastungsart existiert momentan noch keine ausreichende Datenbasis. Exemplarisch zeigt **Bild 10** den aufgenommenen Biegemoment-Weg-Verlauf einer Untersuchung an einem Prüfling mit geschliffener Verzahnung, gebundenem Auslauf, Sicherungsringnut bei Nabenlage 0.

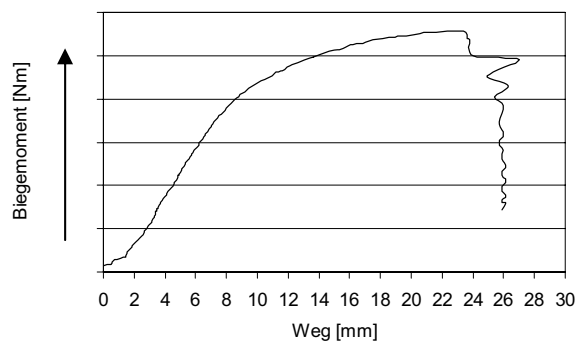


Bild 10: Biegemoment-Weg-Verlauf

4.3 Untersuchungen bei dynamischer Belastung (Torsion)

Auch bei den Dauerschwing-Untersuchungen unter Torsions-Belastung zeigt sich der bei den zugehörigen statischen Versuchen festgestellte, schwächende Einfluss des freien Auslaufs. Sowohl bei den Prüflingen mit geschliffener Verzahnung, wie auch bei denen mit gewalzter Verzahnung, liegen die Wöhlerlinien der Prüflinge mit gebundenem

Auslauf erheblich über denen der Prüflinge mit freiem Auslauf; siehe dazu **Bild 11** und **Bild 12**.

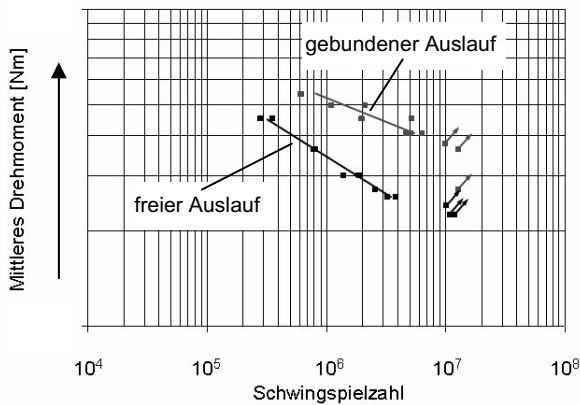


Bild 11: Bruchschwingspielzahlen und Wöhlerlinien für Prüflinge mit geschliffener Verzahnung

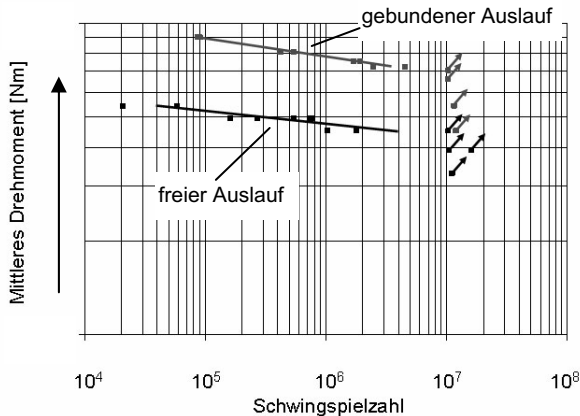


Bild 12: Bruchschwingspielzahlen und Wöhlerlinien für Prüflinge mit gewalzter Verzahnung

Vergleicht man weiterhin die erreichten Bruchschwingspielzahlen bzw. die Wöhlerlinien der Prüflinge mit gleicher Auslaufgeometrie untereinander, so zeigt sich der Einfluss des Fertigungsverfahrens der Verzahnung: Lasthorizonte, die bei Prüflingen mit geschliffener Verzahnung zu Brüchen im Zeitfestigkeitsbereich führen, liegen bei den Prüflingen mit gewalzter Verzahnung größtenteils im Bereich der Dauerfestigkeit.

4.4 Untersuchungen bei dynamischer Belastung (Biegung)

Auch im Bereich der Untersuchungen bei Umlaufbiegung gibt es bereits Ergebnisse. Am weitesten fortgeschritten sind dabei die Untersuchungen an Prüflingen mit freiem Auslauf, geschliffener Verzahnung und bei Nabenlage 0, deren Ergebnisse in **Bild 13** dargestellt sind. Für den Vergleich mit anderen Prüflingsarten fehlen augenblicklich aber weitere Untersuchungsergebnisse.

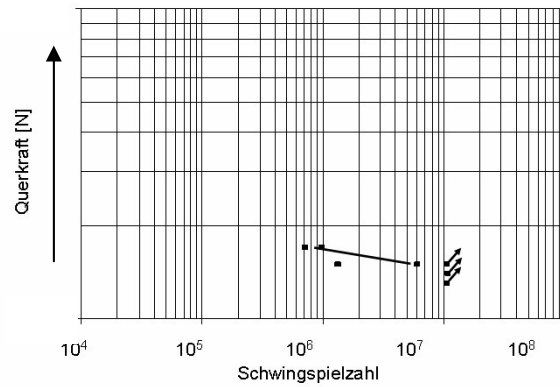


Bild 13: Bruchschwingspielzahlen und Wöhlerlinien für Prüflinge bei Biegebelastung

5 Anmerkungen

Bei den in diesem Artikel präsentierten Ergebnissen wurde bewusst auf die Angabe der betrachteten Legierungen, der genauen geometrischen Maße und weiterer Zahlenwerte verzichtet, da dieses Forschungsvorhaben aus Mitteln der FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik) bzw. der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) finanziert wird. Aufgrund dieser Gegebenheiten stehen die detaillierten Ergebnisse nur den Mitgliedern der o. a. Institutionen zur Verfügung.

6 Zusammenfassung

Im Zuge eines Forschungsvorhabens finden am IMW experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Kerbwirkung an Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480 mit unterschiedlichen Auslaufformen statt. Neben der Auslaufform werden in den Untersuchungen hauptsächlich Werkstoff- und Fertigungseinflüsse betrachtet. Basierend auf dem Vergleich der bereits erhaltenen Ergebnisse lassen sich erste Rückschlüsse zu Gunsten einer Auslaufform und eines Fertigungsverfahrens ziehen.

7 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