

Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen unter typischen Einsatzbedingungen

Wild, J.

Zahnwellenverbindungen (Evolventenverzahnung) stellen, aufgrund ihrer Fähigkeit hohe Torsionsmomente bei stoßartiger Belastung übertragen zu können, eine wichtige Welle-Nabe-Verbindung im Maschinenbau dar. So finden sie beispielsweise Einsatz bei Kreuzgelenkwellen zum Längenausgleich oder im Kraftfahrzeugbereich zur Anbindung der Radnabe. Die Auslegung derartiger Welle-Nabe-Verbindungen ist ganz wesentlich mit der Bestimmung der Kerbwirkung verbunden. Ziel des IGF-Vorhabens BG 16661 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) mit der Nummer FVA 467 II ist es Formzahlen für die Kerbüberlagerung im Verzahnungsauslauf zu bestimmen. Neben dem Forschungsinhalt wird die angewendete Versuchstechnik beschrieben.

Toothed shaft connections (involute toothing) are able to carry high torques with impact loading. Because of this characteristic this kind of shaft-hub joint is commonly utilized in the mechanical engineering. For example they are used in cardan shafts for length adjustment or in the vehicle sector to connect the wheel hub. The aim of the IGF-project BG 16661 of the Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) with the id-number FVA 467 II is to determine the notch factors. The research content and test facilities are presented on the following pages.



1 Motivation

Für die Berechnungen der Ermüdungsfestigkeit insbesondere von Zahnwellenverbindungen besteht der Wunsch, die gegenwärtig in den Berechnungsrichtlinien (DIN 5466, DIN 743) angegebenen Empfehlungen zur Abschätzung der Kerbwirkung zu überprüfen bzw. zu präzisieren. Die Angaben der o.g. Richtlinien weisen Widersprüche auf und berücksichtigen den Einfluss einiger geometrischer Größen (Auslaufgeometrie) bei den Berechnungen nicht. Im IGF-Forschungsvorhaben BG 14058 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) mit der Nummer FVA 467 I wurden deshalb numerische und experimentelle Untersuchungen zur Kerbwirkung bei

Zahnwellen (Evolventenverzahnung DIN 5480) durchgeführt. Zur Validierung der an der TU Dresden durchgeführten numerischen Untersuchungen wurden experimentelle statische Untersuchungen sowie dynamische Dauerfestigkeitsversuche an Verbindungen gemäß DIN 5480 unter reiner schwellender Torsion und reiner wechselnder Biegung an der TU Clausthal durchgeführt. Für den Bereich der Torsionsbelastung konnte eine gute Übereinstimmung von den theoretisch und experimentell bestimmten Kerbwirkungszahlen erreicht werden. Für Empfehlungen von Biegeform- und Biegekerbwirkungszahlen reichten die Ergebnisse noch nicht aus. Insbesondere für die Überlagerung von Torsion und Biegung in praxisrelevanten Größenordnungen fehlen Aussagen, da durch die veränderten Lastverteilungsverhältnisse die bisherigen Resultate nicht übertragen werden können. Antworten bezüglich der genannten offenen Fragestellungen soll das an das oben genannte Forschungsvorhaben anknüpfende IGF-Vorhaben BG 16661 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) mit der Nummer FVA 467 II liefern, welches wie bereits das Vorgängervorhaben vom IMM der TU Dresden und vom IMW der TU Clausthal bearbeitet wird.

2 Zielsetzung

Das Ziel des Vorhabens ist die Ergänzung, Überprüfung und Vervollständigung vorhandener Unterlagen zu allgemein anwendbaren Spannungsform- und Kerbwirkungszahlen an Zahnwellen unter typischen Einsatzbedingungen für den praktischen Gebrauch. Als Ergebnis des Fortsetzungsvorhabens wird der Einfluss

- kombinierter Belastung (Biegung und Torsion)
- der Geometrievariation der Verbindung sowie von Welle und Nabe
- von verfestigten Oberflächen (einsatzgehärtet, gewalzt)
- von Verlagerung/Neigung/Versatz der Welle (mit Empfehlungen zu zusätzlichen anzusetzenden Belastungen) und der daraus resultierenden Lastverteilung

auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen künftig erfassbar sein.

3 Allgemeine Vorgehensweise

Die Ergänzung, Überprüfung und Vervollständigung der in den oben angeführten Normen gegebenen Möglichkeiten zur Abschätzung von Kerbwirkungszahlen soll in der Kombination numerischer und expe-

rimenteller Untersuchungen realisiert werden. Basis für derartige Untersuchungen sind Berechnungsmodelle, deren Eignung, reale Sachverhalte richtig abbilden zu können, parallel experimentell überprüft werden muss. Dies bei der Projektbearbeitung berücksichtigend, ergibt sich der in Abbildung 1 dargestellte Arbeitsablauf.

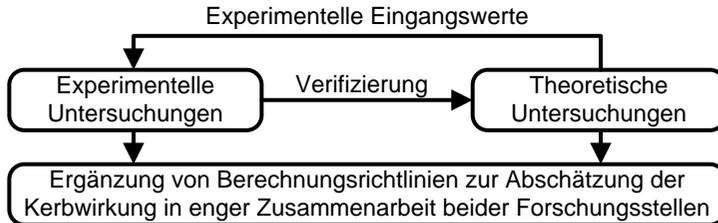


Abbildung 1: Vorgehensweise zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens FVA 467 II

4 Umfang der experimentellen Untersuchungen

4.1 Zum Versuchsprogramm

Wie in der „Zielsetzung“ bereits dargelegt, ist es Gegenstand dieses Forschungsvorhabens, den Einfluss kombinierter Belastungen, der Geometrievariation der Verbindung, von verfestigten Oberflächen und der Verlagerung/Neigung/Versatz der Welle (mit Empfehlung der zusätzlich anzusetzenden Belastung) und der daraus resultierenden Lastverteilung auf die Kerbwirkungszahlen von Zahnwellenverbindungen zu erörtern. Nachfolgend wird ein allgemeiner Überblick über die experimentell zu untersuchenden Faktoren gegeben.

Kombinierte Belastung (Biegung und Torsion)

Zur Ermittlung des Einflusses der Belastungsart auf die Kerbwirkungszahl werden und wurden bereits eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt. Die Prüflinge werden dabei den nachfolgenden Belastungen unterworfen:

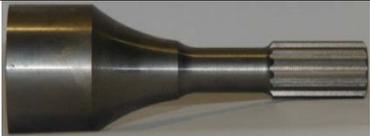
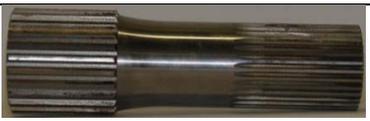
- Dynamische Biegung
- Dynamische Torsion
- Kombiniert dynamische Biegung sowie statische Torsion (Variation des Verhältnisses Biegung/Torsion)
- Kombiniert dynamische Biegung sowie dynamische Torsion

Das Hauptaugenmerk bei diesem Forschungsvorhaben liegt auf der Analyse des Einflusses kombinierter Belastungen.

Geometrievariation der Verbindung

Die Geometrievariation der Verbindung bezieht sich auf geometrische Veränderungen an der Welle und der Nabe als auch deren Positionierung zueinander. Tabelle 1 zeigt die Modifikation der Wellengröße (b) \rightarrow c) sowie der Probengeometrie unter Beibehaltung der Wellengröße (a) frei \rightarrow b) gebunden sowie c) ohne Sicherungsringnut \rightarrow d) mit Sicherungsringnut).

Tabelle 1: Probengeometrien

	
<p>a) Zahnwellenprüfling mit freiem Auslauf, Bezugsdurchmesser $d_B = 25\text{mm}$ (Darstellung ohne Nabe)</p>	<p>b) Zahnwellenprüfling mit gebundenem Auslauf, Bezugsdurchmesser $d_B = 25\text{mm}$ (Darstellung ohne Nabe)</p>
	
<p>c) Zahnwellenprüfling mit gebundenem Auslauf, Bezugsdurchmesser $d_B = 65\text{mm}$, ohne Sicherungsringnut (zu untersuchende Verzahnung rechts im Bild, Darstellung ohne Nabe)</p>	<p>d) Zahnwellenprüfling mit gebundenem Auslauf, Bezugsdurchmesser $d_B = 65\text{mm}$, mit Sicherungsringnut (zu untersuchende Verzahnung rechts im Bild, Darstellung ohne Nabe)</p>

Der Einfluss der Nabenwandstärke auf die Dauerfestigkeit einer Zahnwellenverbindung wird durch deren geometrische Variation bestimmt. Es werden Naben mit einer Wandstärke von ca. 4 mm sowie von ca. 20 mm untersucht.

In Abhängigkeit der Nabenlage wirkt eine unterschiedliche Anzahl örtlich spannungserhöhender Faktoren in Kombination (Kerbüberlagerung). Erwartungsgemäß zeichnet sich dies in der Dauerfestigkeit bzw. in der Höhe der Kerbwirkungszahl ab. Der Beweis für diesen Sachverhalt sowie eine entsprechende Quantifizierung werden experimentell erbracht. Hierzu werden Versuche bei zwei unterschiedlichen Nabenlagen bei sonst gleichen

Versuchsparametern durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die getroffenen Nabenlagendefinitionen.

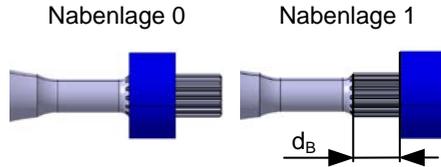


Abbildung 2: Die betrachteten Nabenlagen 0 und 1

Bezugnehmend auf Abbildung 2 nehmen bei der Nabenlage 0 folgende Faktoren spannungserhöhenden Einfluss an der dem Verzahauslauf zugewandten Nabenkante:

- Der durch die Querschnittsveränderung entstehende Absatz vom ungestörten Probendurchmesser im Bereich des Auslaufs hin zum Fuß- bzw. Kopfkreisdurchmesser der Verzahnung
- Der durch die Nabe entstehende Steifigkeitssprung
- Die Evolventenverzahnung der Zahnwelle

Im Gegensatz hierzu herrschen bei Nabenlage 1 an der gleichen Nabenkante nur zwei sich überlagernde spannungserhöhende Einflussfaktoren vor. Dies sind

- der durch die Nabe entstehende Steifigkeitssprung sowie
- die Evolventenverzahnung der Zahnwelle.

Verfestigung der Oberfläche (einsatzgehärtet, gewalzt)

Die Randschicht eines Bauteils nimmt wesentlichen Einfluss auf dessen Schwingfestigkeit. Charakterisieren lässt sich diese durch

- die Oberflächenrauheit,
- ihre Härte, Festigkeit, den Gefügestand
- sowie die in ihr vorherrschenden Eigenspannungen.

Diese Größen können durch mechanische (umformende Fertigungsverfahren, Kugelstrahlen, Hämmern etc.), thermische (Glühen, Vergüten) und thermochemische (Einsatzhärten, Nitrieren etc.) Verfahren beeinflusst werden.

Häufig angewendete Fertigungsverfahren zur Verzahnung von Wellen sind Fräsen/Schleifen (spanend) sowie Walzen (umformend). Diese Verfahren nehmen in unterschiedlichem Maß Einfluss auf die Randschicht. Erwartungsgemäß herrschen bei gewalzten Verzahnungen höhere Druckeigenspannungen in den oberflächennahen Bereichen als bei gefrästen. Diese

Eigenspannungen führen zu einer höheren Dauerfestigkeit. In welcher Höhe sich dieser Effekt auf die Wechselfestigkeit von Zahnwellenverbindungen auswirkt soll im Rahmen experimenteller Untersuchungen ermittelt werden. Hierzu wird eine Diversifizierung der Wellenprüflinge nach fertigungstechnischem Gesichtspunkt vorgenommen. Es wird unterschieden zwischen durch Fräsen und durch Walzen hergestellte Verzahnungen.

Die oben angeführten Einflüsse thermischer und thermochemischer Verfahren auf die Ausbildung der Bauteilrandschicht und folglich auf die Bauteildauerfestigkeit sind Bestandteil des Versuchsprogramms und werden mithilfe von Dauerfestigkeitsuntersuchungen quantifiziert. Unter Berücksichtigung der gegenwärtigen werkstofflichen Bedeutung für den Maschinenbau werden Prüflinge aus 42CrMo4 (1.7225) in vergütetem und 17CrNi6-6 (1.5918) in einsatzgehärtetem Zustand experimentell untersucht.

4.2 Angewendete Versuchstechnik

Wie bereits erläutert ist es Ziel dieses Forschungsvorhabens, Einflussgrößen auf die Dauerfestigkeit einer Zahnwellenverbindung (Evolventenverzahnung) sowie deren Ausmaß des Einflusses zu erörtern. Zu diesem Zweck werden Zahnwellenverbindungen unterschiedlicher geometrischer Konstellation mit unterschiedlichen Belastungsarten beaufschlagt. Das gewünschte Ergebnis, nämlich der Einfluss eines bestimmten Parameters wie beispielsweise des Größeneinflusses, kann nun so ermittelt werden, indem genau dieser Parameter bei einer Verbindung variiert und das Ergebnis der entsprechend zugehörigen experimentellen Untersuchung jenem der Wellen-Nabe-Verbindung ohne Parameterveränderung gegenübergestellt wird. Dies liefert qualitative wie auch quantitative Erkenntnisse bezüglich der Tragfähigkeit der Verbindung.

Im Nachfolgenden wird auf die angewendete Versuchstechnik zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens eingegangen. Diese ist universell einsetzbar und nicht projektgebunden. Durch die Herstellung entsprechender Adapterstücke können schnell eine Vielzahl unterschiedlicher Prüflinge in die entsprechenden Prüfstandkonzepte eingebunden und geprüft werden.

4.2.1 Rein dynamische Torsion

Wie in Kapitel 4 erläutert ist es unter anderem Gegenstand des Forschungsvorhabens, den Größeneinfluss auf Form-/Kerbwirkungszahlen bei Zahnwellenverbindungen zu untersuchen. Zur Umsetzung

werden Wellenprüflinge mit einem Bezugsdurchmesser von 65 mm mit gebundenem Auslauf bei einer schwellenden Torsionsbelastung hinsichtlich der Tragfähigkeit der Welle-Nabe-Verbindung analysiert. Zur Durchführung dieser Untersuchungen findet der in Abbildung 3 dargestellte Prüfstand Anwendung.



Abbildung 3: Versuchsstand zur Analyse von Prüflingen mit einem Bezugsdurchmesser von 65 mm bei dynamischer Torsion

Die Versuchsdurchführung erfolgt bei rein schwellend dynamischer Torsionsbeanspruchung. Das Torsionsmoment wird weggesteuert über eine Spindel sowie eine Exzentermechanik in Kombination bei einem konstanten Spannungsverhältnis von $R=0,2$ aufgebracht. Dabei wird die Torsionsmittellast durch die in Abbildung 3 hervorgehobene Spindel eingestellt. Die Torsionsmomentamplitude ergibt sich in Abhängigkeit der jeweilig verbauten Exzentermechanik. Durch Auswechseln dieser kann die Höhe der Amplitude variiert werden. Die Dynamik ergibt sich durch Rotation der Exzentermechanik.

4.2.2 Rein dynamische Biegung (Wechselbiegung)

Bestandteil des Forschungsvorhabens ist ebenfalls die Bestimmung des Einflusses der Belastungsart auf die Dauerfestigkeit der Welle-Nabe-Verbindung. Diesbezüglich gilt es experimentelle Untersuchungen bei reiner Torsion und bei reiner Biegung durchzuführen und diese einander Gegenüberzustellen.

Der zur Analyse von Welle-Nabe-Verbindungen verwendete Prüfstand soll nachfolgend vorgestellt werden. Aus gegebenem Anlass wurde im Rahmen der Projektbearbeitung das in Abbildung 4 dargestellte Prüfstandkonzept ausgearbeitet.

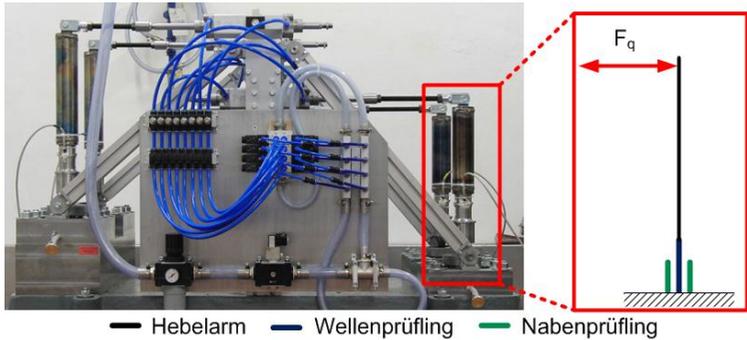


Abbildung 4: Versuchsstand zur Analyse von Prüflingen unter dynamischer Biegebelastung (Wechselbiegung)

Besonderheit dieses Versuchsstands sind die Prüflingsanordnung in vertikaler Richtung sowie die kraft- und nicht weggesteuerte Aufbringung des Biegemomentes über Pneumatikzylinder. Über die Dauer eines Versuchs wird an Stellen mit Relativbewegung unter entsprechender Last Verschleiß auftreten. Bei Anwendung eines weggesteuerten Versuchskonzeptes hätte dieser verringern Einfluss auf die Probenbelastung, was durch die hier genutzte Kraftregelung ausgeschlossen wird.

Die vertikale Prüfstandanordnung stellt sicher, dass sich die Welle-Nabe-Verbindung während des Testvorgangs in axialer Richtung nicht lösen kann. Dies resultiert aus der durch das Eigengewicht der sich oberhalb der Prüflinge befindlichen Konstruktionsbestandteile aufgeprägten Vorzugsrichtung hin zur Prüfstandgrundplatte.

Bei der Untersuchung von Zahnwellenverbindungen tritt ohne das Treffen entsprechender Vorkehrungen in aller Regel Reibkorrosion auf. Dies hat häufig unerwünschten Einfluss auf den Verlauf experimenteller Untersuchungen. Abhilfemaßnahme diesbezüglich ist die Trennung der sich versuchsbedingt in Relativbewegung zueinander befindlichen Oberflächen von Welle und Nabe durch einen Schmierfilm. Die vertikale Ausrichtung der Prüflinge wie auch die Tatsache, dass der Hebel zur Aufbringung des Biegemomentes keine rotatorische Bewegung vollführt, ermöglichen dies zuverlässig.

4.2.3 Dynamische Biegung sowie statische Torsion in Kombination

Eine Welle ist definitionsgemäß ein stabförmiges Bauteil, das primär zur Torsions- und sekundär zur Biegemomentübertragung genutzt wird. In der Praxis kommt eine Kombination dieser beiden Belas-

tungsarten häufig vor. Von den Untersuchungen der reinen Belastungen kann gegenwärtig nicht mit ausreichender Genauigkeit auf die Tragfähigkeit einer Zahnwellenverbindung bei entsprechender Lastkombination rückgeschlossen werden. So sind Tragfähigkeitsuntersuchen von Zahnwellenverbindungen bei dynamischer Biege- und statischer Torsionsbelastung in Kombination Bestandteil dieses Forschungsvorhabens. Anwendung hierfür findet der in Abbildung 5 schematisch dargestellte Prüfstand.

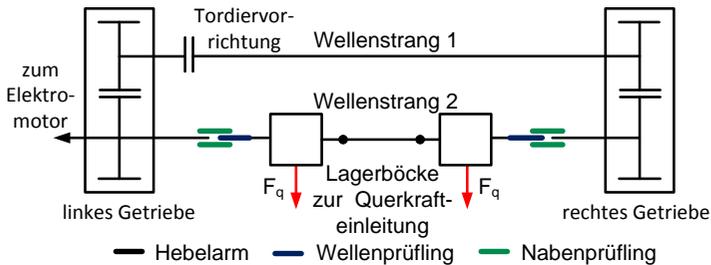


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Prüfstands zur Analyse von Prüflingen bei statischer Torsions- und dynamischer Biegebelastung in Kombination (geschlossener Torsionsverspannkreis)

Mit Hilfe dieses Versuchsstands können zeitgleich zwei Welle-Nabe-Verbindungen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit untersucht werden. Das Torsionsmoment wird mittels eines Hydromotors (Tordiorrichtung) in Zusammenspiel mit einem geschlossenen Torsionsverspannkreis eingeleitet. Resultierend hieraus herrscht an beiden Prüfstellen des Versuchsstands das gleiche Torsionsmoment in statischer Form vor. Das Biegemoment wird für jede Prüfstelle unabhängig von der anderen durch die Auslenkung des jeweils zugehörigen Lagerbocks quer zur Rotationsachse eingebracht. Die Biegemomentendynamik ergibt sich durch die Rotation der Wellen.

4.2.4 Dynamische Biegung sowie dynamische Torsion in Kombination

Wie bereits in Kapitel 4.2.3 erläutert, ist für die Praxis besonders die Tragfähigkeit von Welle-Nabe-Verbindungen bei kombinierter Torsions- und Biegebelastung von Bedeutung. Zuvor wurden die Versuchseinrichtung zur Untersuchung von Verbindungen bei statischer Torsions- und dynamischer Biegebelastung beschrieben. Nachfolgend soll auf den Prüfstand zur Analyse bei kombiniert dynamischer Biegung sowie dynamischer Torsion eingegangen werden, vgl. Abbildung 6.

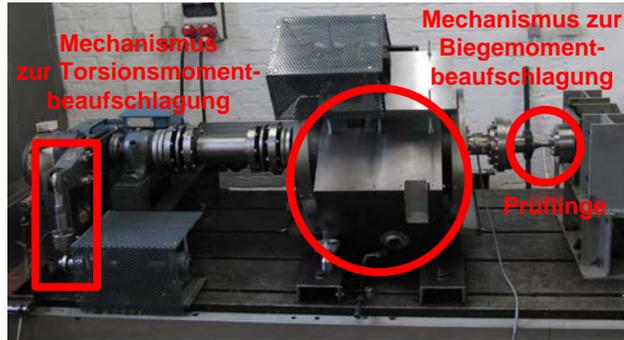


Abbildung 6: Darstellung der Mechanismen zur Lastaufbringung sowie des Zahnriementriebs zur Lastsynchronisation

Die Erzeugung der Torsionsmomentmittelast und der Torsionsmomentamplitude erfolgt analog zu dem in Kapitel 4.2.1 dargestellten Versuchskonzept. Das Biegemoment wird durch die Auslenkung des Wellenstrangs quer zur Achsrichtung eingeleitet. Der hierfür erforderliche Mechanismus befindet sich innerhalb des in Abbildung 6 gekennzeichneten Gehäuses. Die aus der Querkraft resultierende bei Stillstand des Prüfstands vorherrschende stationäre Biegung führt im Prüfbetrieb zu einer Umlaufbiegebelastung. Das Biegemoment ist stufenlos einstellbar. Die maximale Prüflingsbeanspruchung liegt dann vor, wenn zeitgleich das maximale Biege- als auch das maximale Torsionsmoment vorherrscht. Damit dieses Ereignis im Rahmen der Versuchsdurchführung bei jeder Umdrehung bzw. jedem Schwingenspiel eintritt und zudem der Ort der maximalen Bauteilbeanspruchung sich nicht ändert, ist eine exakte Synchronisation der Drehzahlen zur dynamischen Torsions- und zur dynamischen Biegemomenterzeugung erforderlich. Realisiert ist diese über einen Zahnriementrieb zwischen den Antriebswellen zur Torsions- und Biegemomenteinleitung unter Verwendung lediglich eines Elektromotors als Systemantrieb.

5 Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung sowie bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsvorhabens.