

Zahnwellen-Verbindungen als Längenausgleich in Gelenkwellen

Schäfer, G.

Entsprechend der Kombination von Funktionsträgern innerhalb einer Kreuzgelenkwelle mit verzahntem Längenausgleich, ist deren Dimensionierung auszuführen. Besonderes Augenmerk wird in diesem Artikel auf die Betriebssicherheit des Längenausgleichs unter Verschleiß und dessen Gestaltungsregeln gelegt.

The combination of different machine elements like bearings and involute-shaft-hub-connection makes a detailed calculation necessary. The article is focused on the calculation of the splined part under friction wear and its design recommendations.

1 Einleitung

Gelenkwellen gehören innerhalb der Maschinenelemente zur Gruppe der nichtschaltbaren Kuppelungen. Durch ihre Gelenke können sie Winkel- und Radialversätze in Antriebssträngen ausgleichen. Die Gelenke werden bei hohen Drehmomentbeanspruchungen in der Form des Kreuzgelenks ausgeführt. Für den axialen Ausgleich beim Betrieb von Gelenkwellen kann in der Zwischenwelle ein Längenausgleich in Form einer Zahnwellen-Verbindung verwendet werden (**Bild 1**). Ein Kreuzgelenk besitzt bei Abbeugung ein ungleichförmiges und nichtlineares Übertragungsverhalten. Bei der Zusammenschaltung zweier Kardangelenke zu einer Gelenkwelle in W- oder Z-Anordnung weist die Gelenkwelle insgesamt ein gleichförmiges, konstantes Übersetzungsverhältnis auf. Die Zwischenwelle besitzt jedoch auch bei konstanten Beugungswinkeln eine ungleichförmige Drehbewegung, durch die der Längenausgleich dynamisch torsions- und biegebelastet wird. Aufgrund von Schadensanalysen der letzten zehn Jahre ist selten der Gelenkbereich o-

der die Gestaltfestigkeit der Verzahnung die primäre Ausfallursache. Der häufigste Grund von Ausfällen an diesen Elementen ist der Verschleiß im Längenausgleich durch Reibkorrosion und weitere Formen von Abrasivverschleiß (**Bild 2**).

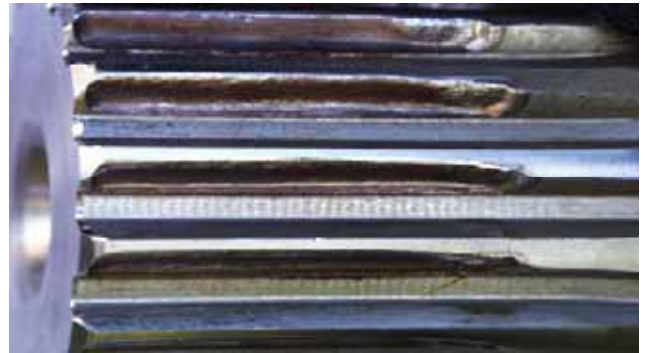


Bild 2: Reibverschleiß an einer Axialausgleichs-Wellenverzahnung

Verschleiß an einer Zahnwellen-Verbindung die Flanken, stellt sich Spiel in der Verbindung ein. Im verzahnten Längenausgleich treten beim umlaufenden Betrieb der Gelenkwelle dadurch Knickspiel oder Vibrationen auf. Es kommt zu erhöhten Unwuchten durch Massenverlagerungen (**Bild 3**), die zum Versagen der Gelenkwelle führen können.

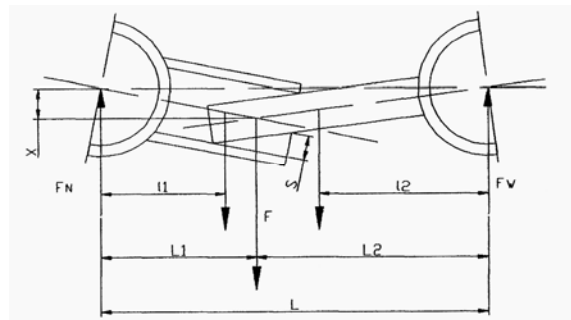


Bild 3: Knickspiel im Längenausgleich einer Gelenkwelle /1/

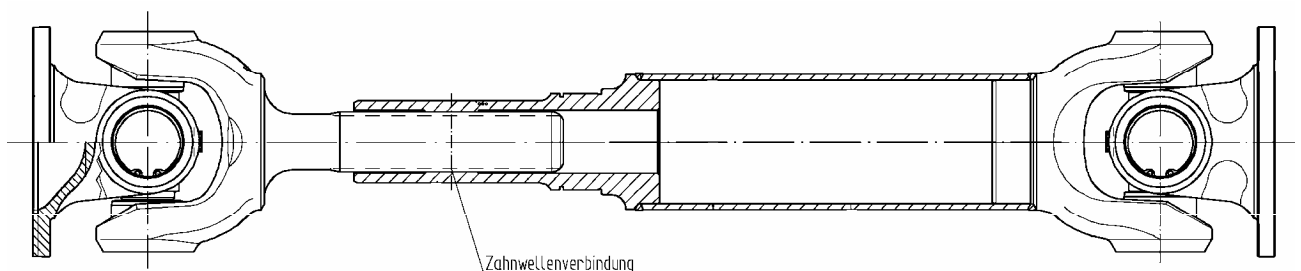


Bild 1: Kreuzgelenkwelle mit Zahnwellen-Verbindung als Längenausgleich

Für die betriebssichere Dimensionierung des Längenausgleiches an Gelenkwellen existiert bis jetzt noch keine allgemein anerkannte und einheitliche Berechnungsvorschrift. Der aktuelle Kenntnisstand, der wesentlich in Forschungsvorhaben der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) erarbeitet wurde, behandelt ausschließlich das dynamische bzw. kinematische Verhalten von Gelenkwellen mit Kreuzgelenken.

In der 2003 erschienenen überarbeiteten VDI-Richtlinie 2722 „Gelenkwellen und Gelenkwellenstränge mit Kreuzgelenken“ finden sich Erläuterungen und Anweisungen zu Einbaubedingungen für die Homokinematik beim Betrieb. /3/

2 Problemstellung

Papendorf beschreibt in /2/ die speziellen Anforderungen von Gelenkwellen für den hochtourigen Lauf, der bei endlichen Durchmessern die notwendige Steigerung des Leistungsdurchsatzes ermöglicht. Danach sind konstruktive Maßnahmen und deren abgesicherter Festigkeitsnachweis zwingend erforderlich. Eine konstruktive Maßnahme zur Beeinflussung der biegekritischen Drehzahl ist unter anderem ein biege-steifer Längenausgleich. Für die Sicherstellung dieser Eigenschaft muss über der Betriebszeit das Verschleißverhalten im Längenausgleich betrachtet werden. Eng verbunden mit dem Verschleiß ist nach bei hochtourig laufenden Gelenkwellen die Schmierung im Bereich des verzahnten Längenausgleiches zu betrachten. Er gibt eine konstruktive Lösung zur Verhinderung des Abschleuderns von Fett an und nennt den spielbehafteten verzahnten Längenausgleich als begrenzendes Kriterium für die Wuchtgüte einer Gelenkwelle. Das Knickspiel im Längenausgleich kann zu Massenverlagerungen in der Zwischenwelle führen. Besonders bei geringen Drehmomenten verliert die flankenzentrierte Verzahnung nach DIN 5480 ihre Zentrierwirkung und knickt im funktions- und verschleißbedingten Verzahnungsspiel unter Eigengewicht ein, was entsprechende Unwuchten zur Folge hat. Dieser Fall ist bei den Zahnwellen-Verbindungen als Betriebsfall mit überwiegender Querkraft bekannt /4/. Auf Basis der industriell möglichen Untersuchungen wird in /1/ ein höherer Überdeckungsgrad in der Verzahnung zur Reduzierung des Knickspiels im Längenausgleich empfohlen, ohne jedoch konkrete Angaben zur Ausführungslänge machen zu können. An diesem Punkt sind Grundlagenuntersuchungen notwendig, die auch durch ein theoretisch konstruktives Arbeitspa-

ket zur Leitung von Biegemomenten durch Längenausgleichselemente ergänzt sein sollten. /1-2/

3 Lösungsweg

Die bei den Gelenkwellen wirksame Schädigungskette führt von der radialen und axialen Relativbewegung im Längenausgleich über dessen Reibungseigenschaften (Schmierung) zum Verschleiß und der damit verbundenen Spielzunahmen, die letztendlich ein unzulässiges Knickspiel und Unwuchtkräfte hervorruft. Die Reduzierung der Gestaltfestigkeit durch Verzahnungskerbene (Bild 4) ist für die betriebssichere Dimensionierung von hochtourigen Gelenkwellen nur von sekundärer Bedeutung. Die Beeinflussung der Lebensdauer und Tragfähigkeit von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen erfolgt durch zwei weitere prinzipiell verschiedene Vorgänge: Verschleiß und Ermüdung. Das verschleißbedingte Abtragen von Zahnflankenbereichen führt von Beginn an schmierungsabhängig zu einer kontinuierlichen Spiel- und Exzentrizitätsvergrößerung. Im Bereich höherer Lastwechselanzahlen kommt es dann ermüdungsbedingt zusätzlich zum Ausbrechen einzelner Flankenbereiche. Beide Vorgänge überlagern sich und führen damit zum 'Aufbrauchen' der Formschlusselemente.

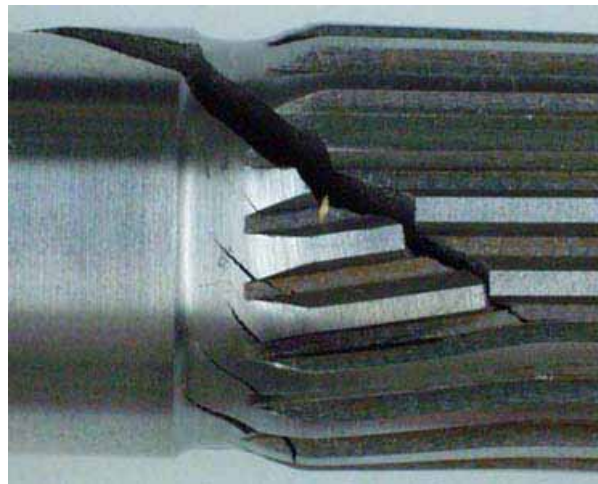


Bild 4: Gestaltfestigkeitsschaden durch Torsionsbruch an Verzahnungskerbene /5/

Im Rahmen der am IMW laufenden Untersuchungen für Die FVA und ihre Mitgliedsfirmen sollen mittels experimenteller und theoretischer Untersuchungen verschleißrelevante Parameter herausgearbeitet und eine entsprechende Gestaltungsrichtlinie abgeleitet werden, mit der die Reibdauerbeanspruchungen unter Berücksichtigung der Betriebsbelastungen gezielt minimiert werden können.

Gelenkwellen lassen sich in die Sparten „Fahrzeugwellen“ und „Industriewellen“ gliedern. Fahrzeuggelenkwellen werden in der Regel mit höheren Drehzahlen betrieben als Industriewellen und unterliegen somit auch anderen Ausfallkriterien.

Um aus den experimentellen Untersuchungen die notwendigen Schlüsse ziehen zu können, werden einerseits die Belastungsparameter (Beugungswinkel, Überdeckungsgrad, Verschiebewege, Drehmoment, Drehzahl, Querkraft, Oberflächenpaarung, Kontaktflächenrauigkeit und Schmierzustand) erfasst und protokolliert. Andererseits werden die sich dabei einstellenden radialen Relativbewegungen, Längskräfte, Bauteiltemperaturen sowie Verdrehflanken- und Knickspiele bestimmt.

Mit den Ergebnissen wird dem Konstrukteur eine Berechnungsgrundlage zur Verfügung gestellt, die es ihm ermöglicht, Längenausgleiche zuverlässig zu dimensionieren. Als Ergebnis des Vorhabens stehen ihm Hinweise für die verschleißarme Ausführung des Längenausgleiches unter praxisrelevanten Einsatzbedingungen zur Verfügung.

4 Experimentelle Untersuchungen

Da dazu im Versuch eine praxisnahe Belastung der Gelenkwelle bei geringen Energiekosten notwendig ist, wird eine Durchführung in einem mechanischen Verspannprüfstand im Umlaufbetrieb realisiert. **Bild 5** zeigt den prinzipiellen Aufbau des Prüfstandes.

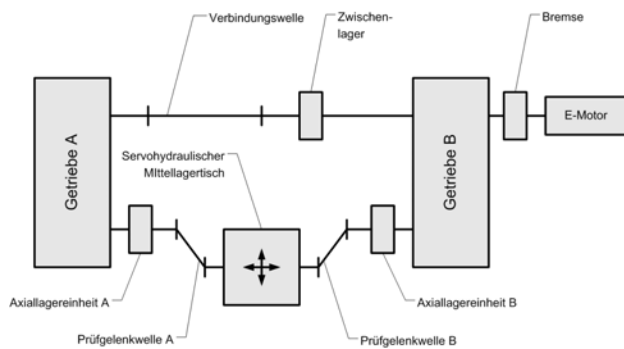


Bild 5: Prüfstandskonzept

Am Institut für Maschinenwesen stehen mehrere Verspannungsprüfstände zur Verfügung. Der leistungsfähigste Prüfstand ist aus zwei Stirnradgetrieben mit einer Leistung von 320 kW bei einer Drehzahl von maximal 2091 U/min im schnelleren Strang und einer Übersetzung von 1:1,4 aufgebaut. Für die Drehmomentverspannung wird ein hydraulischer Verspannmotor mit einem maximalen dynamischen Drehmoment von 2000 Nm bei 2000 U/min verwendet. In **Tabelle 1** sind eingestellten

Prüf-Drehzahlen und –Drehmomente unter Verwendung des vorhandenen Prüfstandes angegeben.

	Drehzahl [1/min]	Drehmoment [Nm]
Verspannmotor	1430	2000
Prüfkörper	1020	2800

Tab. 1: Prüf-Drehzahlen und –Drehmomente (vorhandener Verspannprüfstand)

In **Bild 6** ist eine Übersichtsaufnahme des vorhandenen Gelenkwellenprüfstand zu sehen. Um eine möglichst große Einbaulänge für die Prüflinge zu realisieren wurden die beiden Verspanngetriebe auf einer verlängerten Aufspannplatte montiert und die Verspannmotorwelle links im Bild entsprechend verlängert. **Bild 7** zeigt den Verspannmotor mit seiner hydraulischen Drehdurchführung und einen der beiden gleichzeitig laufenden Prüflinge in abgebeugter Versuchslage.



Bild 6: Gesamtansicht des kleinen Verspannprüfstands, 300 kW umlaufende Leistung



Bild 7: Gelenkwelle in Z-Anordnung mit 10° Beugewinkel im Prüfstand

Zusätzlich zu diesem laufenden Verspannungsprüfstand wird ein weiterer noch leistungsfähigerer Verspannprüfstand im ersten Halbjahr 2007 mit einer umlaufenden Leistung von 1.200 kW aufgebaut. Auf diesem Prüfstand werden dann die größeren

Baugrößen der Gelenkwellen mit verzahntem Längenausgleich untersucht.

Neben dem Beugewinkel wird in weiteren Versuchsreihen auf den beiden Prüfständen ein Verschiebeweg von 1 bis 5 mm unter Drehmomentbelastung von maximal 2,8/11 kNm realisiert.

Bei Gelenkwellen mit Anwendung im Walzwerksbereich und Stückgewichten von bis zu 40 t kann es durchaus vorkommen, dass im Längenausgleich ein ständiges Einknicken stattfindet. Eine Zentrierung durch das Profil wird verhindert. Zur Simulation dieses hohen Eigengewichtes wird in der Versuchsdurchführung von außen am Mittelteil der Gelenkwelle eine Querkraft aufgebracht.

Die Ergebnisse dieser Versuche werden regelmäßig aktuell im Arbeitskreis „Nichtsichtbare Kupplungen“ der FVA den Mitgliedsfirmen zur Nutzung vorgestellt.

5 Numerische Untersuchungen

Die theoretischen Untersuchungen stellen einen flankierenden, aber wesentlichen Arbeitspunkt in diesem Vorhaben dar. Sie haben zum Ziel möglichst stabile Extrapolationsregeln für weitere Baugrößen aufstellen zu können. In diesem Sinn werden die experimentellen Versuchsergebnisse zur Kalibrierung genutzt.

Bild 8 zeigt einen Ausschnitt des FE-Modells. Es handelt sich um den Verzahnungsauslauf der Wellenverzahnung hin zur Gabel des Kreuzgelenks. Darüber ist in dunklerem Ton die dünnwandige Nabe zu erkennen.

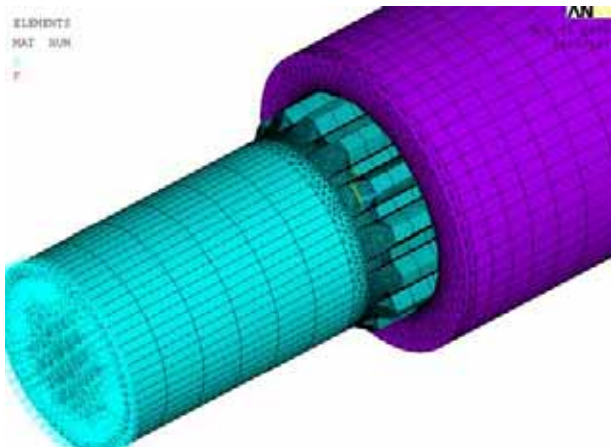


Bild 8: FEM-Vernetzung im Verzahnungsauslauf der Welle mit aufgesetzter Nabe

In **Bild 9** ist dann im größeren Ausschnitt auch der Übergang der Nabe in den Rohrbereich der Gelenkwelle zu erkennen. Bild 9 zeigt auch die Vertei-

lung der Vergleichsspannung nach v. Mises in der Nabe unter reiner Torsionsspannung bei linearelastischem Werkstoffverhalten. Trotz der dünnwandigen Ausführung der Nabe tritt auch bei der großen Überdeckungslänge von 3,0 x Bezugsdurchmesser die charakteristische Spannungsüberhöhung am lasteinleitungsseitigen Nabenrand auf.

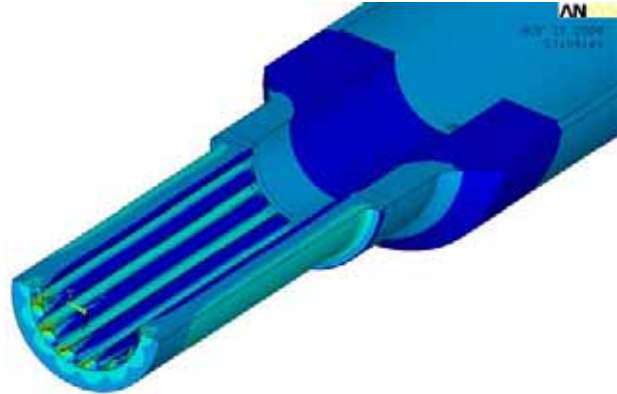


Bild 9: Vergleichsspannung in der Nabe nach v. Mises

6 Weitere Informationen

Interessierte können sich für weitere Ergebnisse auch an Herrn Hagemann bei der FVA in Frankfurt wenden (bernhard.hagemann@vdma.org).

Die Förderung dieses Forschungsvorhabens erfolgt mit Mitteln der Stiftung Industrieforschung unter der Projekt-Nr. S 747.

7 Literatur

- /1/ Ritter, N.; Papendorf, J.: Konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung zulässiger Betriebsdrehzahlen von Kreuzgelenkwellen in Schienenfahrzeugen. Konferenz-Einzelbericht: 5. Schienenfahrzeugtagung. Band 5 (2002) Seite 52-54, Tezloff Verlag Hamburg
- /2/ Papendorf, J.: Einsatz von Kreuzgelenkwellen in hochtourigen Antrieben. Konferenz-Einzelbericht: Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, Tagungsband (2003), Seite 693-709, Verlag Mainz, Aachen
- /3/ VDI-Richtlinie 2722: Gelenkwellen und Gelenkwellenstränge mit Kreuzgelenken Einbaubedingungen für Homokinematik, August 2003
- /4/ Schäfer, G.: Der Einfluß von Oberflächenbehandlungen auf das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebeseit. Dissertation Technische Universität Clausthal, 1995
- /5/ Dietz, P.; Garzke, M.: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Zahnwellenfestigkeit Di 289/9-2. Clausthal, 1998