

Untersuchung von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz bezüglich ihrer Montage- und Betriebseigenschaften

Burgtorf, U.

Neben den ursprünglich formschlüssigen Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebesitz hat sich als zweite Ausprägung die Zahnwellen-Verbindung mit Preßsitz entwickelt. Bei dieser zweiten Form einer Zahnwellen-Verbindung wird ein Preßsitz erzeugt, der eine axiale Verschiebbarkeit unterbindet. Über die Einflüsse der Zahngeometrie und der Passung auf das Montage- und Betriebsverhalten der Preßsitz-Verbindungen liegen bisher keine Erkenntnisse vor. Am Institut für Maschinenwesen (IMW) wird in einem von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) geförderten Forschungsvorhaben das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz untersucht.

Besides the splined shaft connections with clearance fit a second kind of these shaft-hub connections with an interference fit was created. This connection leads to a press fit which prevents axial relativ movement between hub and shaft. There is no knowledge until now about the influence of tooth-geometry and magnitude of interference on the assembling and operating characteristics. At the IMW the load behaviour of splined shaft connections with press fit is investigated in a research project promoted by the Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.

1 Einleitung

Die bisher am IMW durchgeführten Forschungsvorhaben führten zu experimentell abgesicherten Erkenntnissen zur Abschätzung des Verschleiß- und Funktionsverhaltens von Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebesitz während ihrer Einsatzdauer sowie zu Berechnungsansätzen zur Bestimmung des Beanspruchungsverhaltens /1 - 5/. Aufgrund der erheblich steigenden Anzahl der Anwendungsfälle von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz in den FVA-Mitgliedsunternehmen wurde eine Untersuchung dieser Form von Zahnwellen-Verbindungen überaus notwendig. Dem Konstrukteur sollen mit Hilfe dieser Untersuchungen Informationen zur wirtschaftlichen

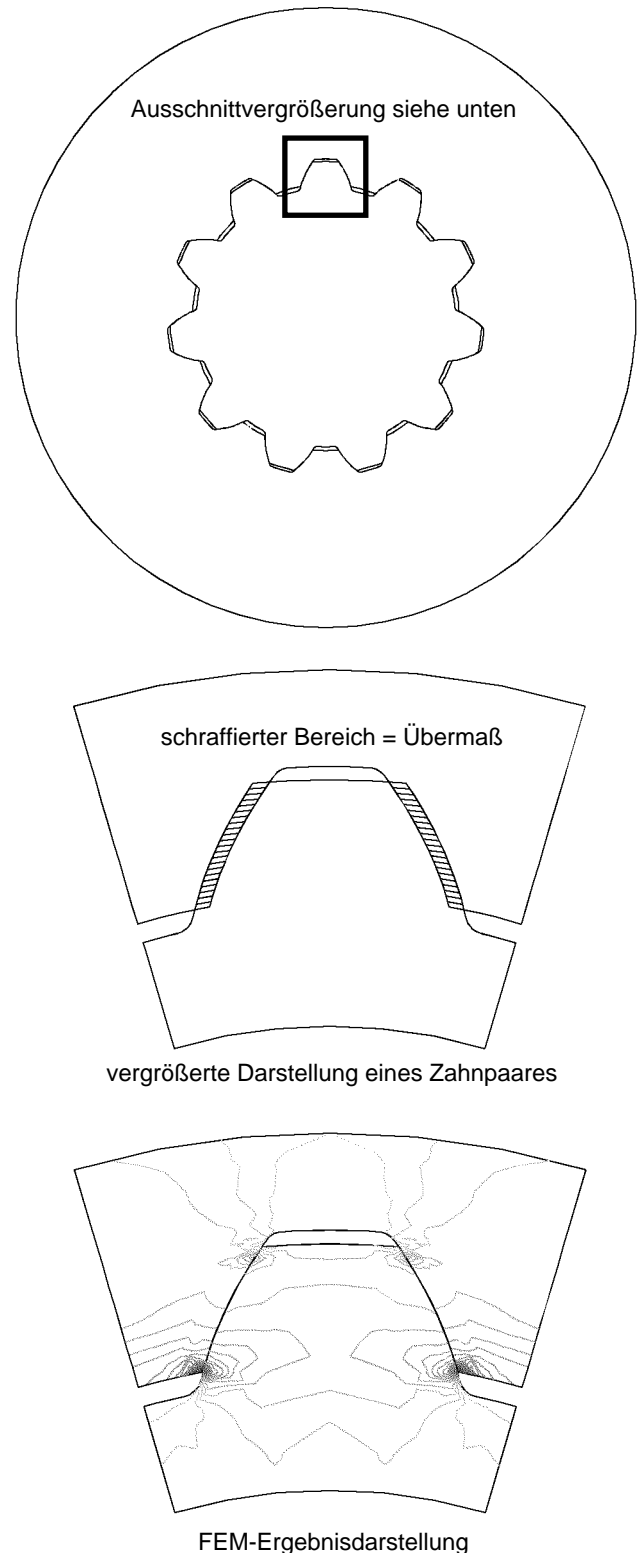


Bild 1: Zahnwellen-Verbindung mit Darstellung des Übermaßes und der Beanspruchungsverläufe aus einer FEM-Rechnung

Auslegung derartiger Welle-Nabe-Verbindungen zur Verfügung gestellt werden. Dies kann sowohl durch Vorschlag einer kostengünstigen und störungsfreien Montagemöglichkeit, durch Hinweise auf geeignete Werkstoffpaarungen und Verzahnungsgeometrien als auch durch entsprechende Berechnungsmethoden erfolgen. Die Summe der Ergebnisse wird eine Steigerung der Tragfähigkeit und eine kostengünstigere Fertigung durch gezielte Passungswahl ermöglichen. Insbesondere für den Konstrukteur in den mittelständischen FVA-Mitgliedsunternehmen, der häufig keinen Zugang zu kosten- und zeitintensiven Untersuchungen findet, besteht hier die Möglichkeit des direkten Zugriffs auf praktisch umsetzbare Ergebnisse, die durch Mitarbeit in den Arbeitskreisen der FVA beeinflussbar sind. Ein weiterer Vorteil liegt in den exklusiven Nutzungsrechten der Ergebnisse, die zunächst nur den Mitgliedsunternehmen zugänglich sind.

Dieser Artikel soll einen Überblick über den Inhalt und den Stand der Arbeiten des FVA-Forschungsvorhabens Nr. 250 "Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz" geben.

2 Problemstellung

Neben der Zahnwellen-Verbindung mit Schiebesitz, die ursprünglich als formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung durch leichte Montierbarkeit und axiale Verschiebbarkeit zum Längenausgleich entworfen wurde, hat sich als zweite Form die Zahnwellen-Verbindung mit Preßsitz mit einem sehr unterschiedlichen Einsatzgebiet entwickelt. Der Unterschied zwischen diesen Zahnwellen-Verbindungen besteht in der Wahl der Passung, die bei der zweiten Form einen Preßsitz erzeugt, der keine axiale Verschiebung mehr zuläßt. Jegliche Bewegung, wie sie z.B. bei Zahnkupplungen möglich ist, wird durch den Preßsitz ausgeschlossen. Die in Zahnwellen-Verbindungen zwischen Welle und Nabe auftretenden Mikrobewegungen, die die Hauptursache für den Verschleiß und den Ausfall dieser Welle-Nabe-Verbindungen sind, können aber auch durch den Preßsitz nicht vollständig unterbunden werden.

Der Vorteil der Zahnwellen-Verbindung mit Preßsitz gegenüber normalen reibschlüssigen Preßverbindungen und Polygonverbindungen besteht in der

wesentlich geringeren notwendigen Nabenwandstärke. Dies ist speziell bei einer auf der Nabe vorhandenen Laufverzahnung interessant, da hierdurch Räder geringerer Baugröße möglich sind und diese zu einer Kostenminimierung führen. Die Hauptfunktion "Drehmoment übertragen" wird wie bei allen Zahnwellen-Verbindungen formschlüssig erfüllt. Der erforderliche Paßfugendruck bei einer abweichungsfreien Zahnwellen-Verbindung ist daher erheblich niedriger als bei einer reibschlüssigen Verbindung. Neben den Vorteilen der geringen Nabenwandstärke und der Verringerung der Relativbewegungen zwischen Welle und Nabe ergeben sich jedoch Toleranzprobleme in der Fertigung und Montage.

Aufgrund der am IMW bisher gewonnenen Forschungsergebnisse müssen die Einflüsse von Teilungsabweichungen und Zahnformabweichungen beim Fügevorgang der Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz erheblich kritischer eingestuft werden als bei Verbindungen mit Schiebesitz. Die bei den Verbindungen mit Schiebesitz vorhandenen Flankenspiele können auftretende Abweichungen in den meisten Fällen überbrücken. Bei Verbindungen mit Preßsitz ist dies nicht der Fall, durch die Herstellungsabweichungen können sich erhebliche Probleme bei der Montage ergeben.

Ein weiteres wesentliches Problem sind die durch Teilungsabweichungen auftretenden Ungleichförmigkeiten in der Lastverteilungen, die in örtlich hohen Beanspruchungen resultieren. Sie führen zu plastischen Verformungen oder auch zum Abheben einzelner Zahnflanken. Bei Ausnutzung des Nabenwandstärkevorteils kann es sogar zu einem Platzen der Nabe kommen.

3 Stand der bisherigen Forschung

Die auf dem Gebiet der Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 /6/ bislang durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich auf Verbindungen mit Schiebesitz. In dem laufenden FVA-Vorhaben werden die für Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz spezifischen Probleme beim Fügevorgang und im Betrieb bearbeitet. Die Schwerpunkte des Vorhabens liegen für die ersten Arbeitsschritte in dem Bereich Passung und Zahnflankenpressung. Die Untersuchungen verschiedener Passungen bzw. Über-

maße führen über die Zahnflankenpressung zur Übertragungsfähigkeit der Verbindung, die in Form des übertragbaren Drehmomentes das Hauptauslegungskriterium für diese Welle-Nabe-Verbindungen bildet. Durch das zu übertragende Drehmoment ist eine minimal notwendige Flankenpressung und die dazugehörige Passung gegeben. Je nach Passungswahl können in Abhängigkeit von der Herstellungsqualität Schwankungen der Aufpreßkräfte bei der Montage auftreten und im Extremfall zur Nichtmontierbarkeit der Verbindung führen. Aus diesem Grund gehört der Schwerpunkt Toleranz und Qualität mit in dieses Vorhaben.

An das Ende der Untersuchungen sollten Betrachtungen zum Problemkreis Rutschen (Reibverschleiß) gestellt werden. Durch den auch bei Preßsitzverbindungen nach Absinken der Flankenpressung verstärkt auftretenden Reibverschleiß kommt es nach gewissen Laufzeiten zum Ausfall der Zahnwellen-Verbindungen. Das Ausfallkriterium ist bei den Preßsitzverbindungen deutlich anders als bei den Verbindungen mit Schiebesitz, als Ausfallzeitpunkt wird in den meisten Fällen die Aufhebung des Preßsitzes durch den Verschleiß definiert. Im Gegensatz dazu markiert bei den Schiebesitzverbindungen ein zulässiges Verdrehflankenspiel den Ausfallzeitpunkt.

Allgemeine Problemkreise wie Berechnungsverfahren und Konstruktionsregeln für die Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 mit Preßsitz sind weitere wichtige Ziele bei der Bearbeitung des Vorhabens.

4 Lösungsweg

Zunächst erfolgen Untersuchungen zum Kontakt Zahn-Gegenzahn. Mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM) werden Berechnungs-Modelle verschiedener Zahnwellen-Verbindungen erstellt und die Belastung mit unterschiedlichen Übermaßen simuliert **Bild 1**. Es werden hier nur abweichungsfreie Verzahnungen untersucht und ein rein elastisches als auch teilplastisches Materialverhalten angenommen. Anhand der Untersuchungsergebnisse wird eine Aussage über das grundsätzliche elastische bzw. elastoplastische Verhalten der Zähne sowie Aussagen über die Beanspruchung und Aufweitung der Nabe erwartet. Aufgrund der idealen Verzahnung, der

Symmetrieeigenschaften der Verzahnung und der symmetrischen Lastaufbringung durch das Übermaß, ist die Modellierung eines Keilausschnitts für diese FEM-Untersuchungen ausreichend /7/.

Ein weiterer Untersuchungsabschnitt befaßt sich mit der Optimierung der Verzahnungsform hinsichtlich eines günstigen Verformungsverhaltens. Für einen bestimmten Übermaßbereich werden Untersuchungen mit Variation der Flanken- und Fußgeometrie durchgeführt. Dazu werden von der nach DIN 5480 genormten Verzahnungsform ausgehend die Parameter Eingriffswinkel, Zahnfußgeometrie und Abweichung von der Evolventenform variiert. Da auch hier nur abweichungsfreie Verzahnungen betrachtet werden, ist wiederum die Verwendung von keilförmigen Berechnungsmodellen möglich.

Ein dritter Untersuchungsabschnitt befaßt sich mit der Beanspruchungsverteilung über der Verbindungsbreite. Wiederum mit Hilfe von FEM-Rechnungen wird der Einfluß der Lastverteilung über der Verbindungsbreite untersucht. Auch hier werden nur abweichungsfreie Verzahnungen betrachtet. Dazu erfolgt eine Erweiterung der bisher verwendeten ebenen Keilmodelle ins Dreidimensionale.

In einem weiteren Abschnitt wird der Einfluß der Teilungsabweichungen untersucht. Aufgrund der Verzahnungsabweichungen ergeben sich unterschiedliche unsymmetrische Belastungen für den einzelnen Zahn, so daß sich diese Untersuchungen nicht mehr an Keilmodellen durchführen lassen. Um realistische Abweichungsverteilungen und Verformungen der Zahnwellen-Verbindung nachzubilden, sind ebene, vollständige Verbindungsmodelle erforderlich. Jeder Zahn der Verbindung kann somit in der FEM-Simulation mit einem bestimmten Abweichungswert versehen werden. Die Bestimmung der Werte erfolgt mit Hilfe eines Simulationsprogramms und den in DIN 3962 /8/ in Abhängigkeit von der Qualität festgelegten zulässigen Abweichungswerten. Aus den Untersuchungen werden Ergebnisse zum Einfluß der Teilungsabweichungen bzw. der Fertigungsqualität auf das Beanspruchungsverhalten der Zahnwellen-Verbindungen sowie Aussagen über die Montage und das Betriebsverhalten im Bereich der üblichen Toleranzen erwartet.

Die Vermessung einer statistisch hinreichenden Anzahl von Serienteilen ist ebenfalls vorgesehen. Die

Zahnwellen-Verbindungen werden vor und nach dem Fügevorgang vermessen, um Aussagen über die plastischen Verformungen in den Kontaktflächen zwischen Nabe und Welle zu erhalten. Eine Vermessung des Nabenaußendurchmessers liefert zusätzlich die aus dem Fügevorgang resultierende Aufweitung der Nabe. Die Vermessungen dienen zur Absicherung der FEM-Ergebnisse und liefern weitere Informationen über den Einfluß von Teilungsabweichungen.

Anhand einiger ausgewählter Verzahnungsgeometrien sollen mit Hilfe von Fügeversuchen die FEM-Berechnungsergebnisse abgesichert werden. Dazu werden auf den Zahnwellen-Verbindungen Dehnungsmeßstreifen appliziert, so daß die Beanspruchungen während des Fügens in Abhängigkeit von Übermaß und Fügeverfahren ermittelt werden können.

Die dem Konstrukteur bisher zugänglichen Berechnungsverfahren zur Auslegung und zum Tragfähigkeitsnachweis von Zahnwellen-Verbindungen sind um die neu gesammelten Erkenntnisse über den Preßsitz bei Zahnwellen-Verbindungen zu erweitern.

5 Stand des Vorhabens

Zu allen Untersuchungsabschnitten wurden bereits FEM-Untersuchungen durchgeführt, die je nach Abschnitt mehr oder weniger weit vorangeschritten sind. Die FEM-Untersuchungen zum Kontakt Zahn-Gegenzahn sind für ein rein elastisches Materialverhalten abgeschlossen, der Einfluß der Untersuchungsparameter konnte bestimmt werden. Zur Zeit wird mit Hilfe dieser FEM-Ergebnisse ein Berechnungsansatz entwickelt, der eine Berechnung der Flankenpressung aus den Geometrie- und Übermaßangaben ermöglicht. Zur Berücksichtigung des teilplastischen Materialverhaltens ist noch eine entsprechende Erweiterung des Ansatzes erforderlich. Im Rahmen der Untersuchungen zur Optimierung der Verzahnungsform wurden bisher Eingriffswinkel, Zahnfußradius und auch die Zahnform selbst variiert. Der prinzipielle Einfluß der Lastverteilung über der Verbindungsbreite wurde bestimmt und konnte mit den Ergebnissen der zweidimensionalen FEM-Rechnungen verglichen werden. Die Untersuchung weiterer Verbindungsvariationen wird den exakten Einfluß

der Lastverteilung klären. Der Einfluß der Teilungsabweichung eines einzelnen Zahnes auf die benachbarten Zähne sowie auf die gesamte Verbindung konnte ermittelt werden. Anhand weiterer Untersuchungen mit realen Abweichungsverteilungen auf alle Zähne werden die bisher festgestellten Ergebnisse überprüft.

Die Vermessung von Zahnwellen-Verbindungen sowie die Durchführung von Fügeversuchen zur Verifizierung der FEM-Ergebnisse sind neben der Weiterführung der FEM-Berechnungen in den nächsten Arbeitsschritten vorgesehen.

Literatur

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, Selbstverlag des Verfassers, 1978
- /2/ Zapf, R.: Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. Betriebs- und Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebeseitz, FVA-Forschungsvorhaben Nr. 99/I+II, Heft 247, 1987
- /3/ Schäfer, G.: Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. Das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebeseitz, FVA-Forschungsvorhaben Nr. 99/III+IV, 1994
- /4/ Wesolowski, K.: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Zahnwellenfestigkeit, Di 289 /9-1, IMW Clausthal 1994
- /5/ DIN 5466E: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, Beuth-Verlag, Berlin 1994/1995
- /6/ DIN 5480: Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken, Beuth-Verlag, Berlin 1986
- /7/ Burgtorf, U.: Berechnung von Zahnwellen Verbindungen mit Preßsitz unter Verwendung des Finite-Elemente-Programmsystems Marc/Mentat, Institutsmitteilung Nr. 19, IMW Clausthal 1994
- /8/ DIN 3962: Toleranzen für Stirnradverzahnungen, Beuth-Verlag, Berlin 1978