

Arbeiten am IMW rund um Welle-Nabe-Verbindungen

Schäfer, G.

Das IMW betreibt umfangreiche Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Welle-Nabe-Verbindungen. Auch das zurückliegende Jahr war durch einige interessante Arbeitsergebnisse aus diesem Bereich gekennzeichnet. In einer kurzen Übersichtsdarstellung soll dies verdeutlicht werden.

The IMW is a well known research institute for shaft-hub-connections. There were also in the last year a lot of interesting results from that research topic which are shortly described in the following sentences.

1 Vorwort

Ein wesentlicher Forschungsbereich im Institut für Maschinenwesen (IMW) der TU Clausthal sind die Welle-Nabe-Verbindungen und artverwandte Konstruktionselemente. Forschungsarbeiten zu diesem zentralen Themenbereich der mechanischen Antriebstechnik werden am IMW sowohl theoretisch mit numerischen Simulationsberechnungen als auch experimentell auf verschiedenen institutseigenen Prüfständen bearbeitet. Der folgende Artikel soll eine kurze Übersicht zu den im vergangenen Jahr durchgeführten Arbeiten geben.

2 Pressverbindungen

Charakteristisch für die am IMW untersuchten Pressverbindungen ist die teilplastische Beanspruchung in der Verbindung. Der große Anwendungsbereich ungestörter Pressverbindungen mit Vollwelle liegt nicht im Focus der Institutsarbeiten. Stattdessen werden nicht seltene Sonderfälle von solchen Verbindungen mit Störungen durch radiale oder axiale Bohrungen oder teilweise verzahnte Pressfugenbereiche untersucht. Bedingt durch diese lokalen Störungen treten Bauteilbereiche mit hohen Spannungskonzentrationen und daraus folgenden teilplastischen Verformungen auf. Der Einfluss solcher teilplastischen Bereiche auf die Tragfähigkeit der Verbindung unter dynamischen Betriebslasten wurde innerhalb eines Vorhabens für die Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) untersucht, **Bild 1**.

Die zweite Pressverbindungsart mit teilplastisch verformten Bauteilbereichen ist die Innenhoch-

druckgefügte (IHF)-Pressverbindung. Die Welle muss dabei als Rohrquerschnitt ausgebildet sein um das Aufweitewerkzeug aufnehmen zu können.

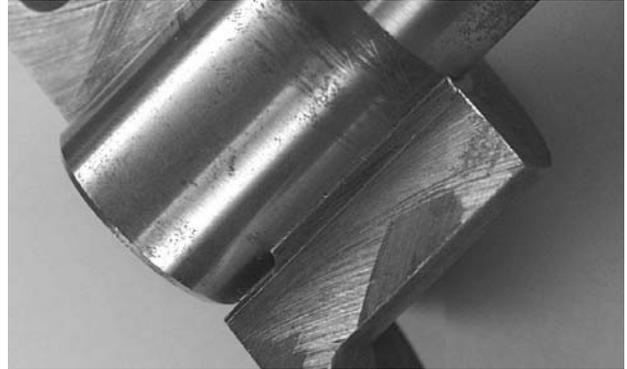


Bild 1: Pressverbindung mit Vollwelle mit Reibkorrosionsschädigung durch Umlaufbiegung

Die Welle wird nach der axialen Positionierung in der Nabe teilplastisch hydraulisch aufgeweitet um den Presssitz zu erzeugen. Für diese Pressverbindungsart wurde, nach den grundlegenden Untersuchungen von Garzke, jetzt auch die experimentelle Absicherung der Berechnungsansätze für Umlaufbiegung von Grünendick durchgeführt. Er konnte dabei die reibschlussstypischen Trainiereffekte nachweisen und interessante konstruktive Empfehlungen zur Wahl der Drucküberstandslänge bei unterschiedlichen Belastungsarten geben. Bei seinen Untersuchungen wurde die von Leidich und Smetana an der TU Chemnitz eingeführte Klaffbelastung bestimmt (**Bild2**), die ein wesentlicher Parameter für die kritische Reibkorrosionsschädigung ist.

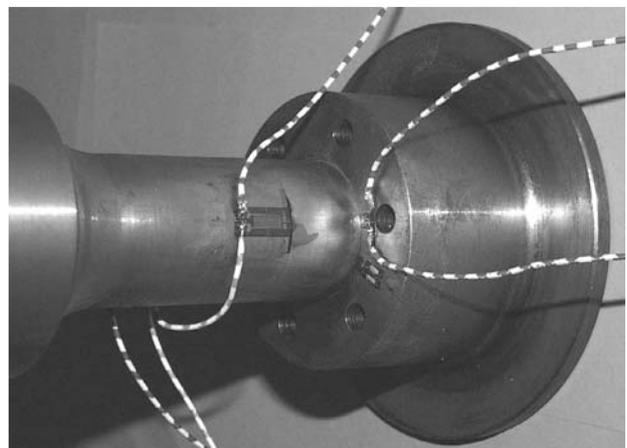


Bild 2: Pressverbindungsprobe mit Messgittern zur Bestimmung des Klaffmomentes

Basierend auf dem so bestimmten Klaffmoment wurden die Dauerversuche gefahren und reibkorrosionsmindernde Ausführungsvarianten ermittelt, **Bild 3**. Erste Erfolg versprechende Versuche konnten auch bezüglich der Wahl der beiden Grundwerkstoffe für Welle und Nabe gemacht werden.

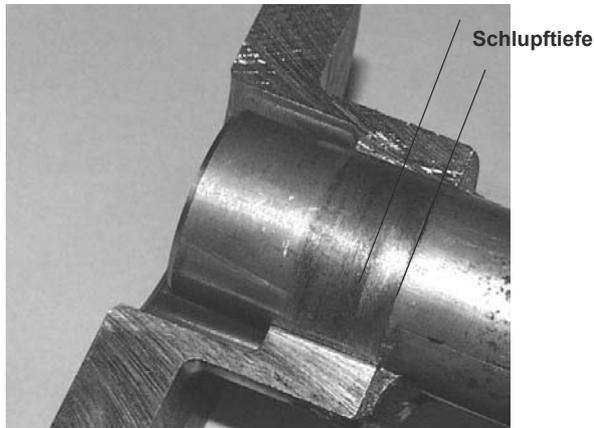


Bild 3: Reibkorrosion an einer IHF-PV, 130% des Klaffmomentes, 10 Mio. Lastwechsel

Besonders interessant sind im werkstofflichen Zusammenhang die Ergebnisse mit beschichteten Pressflächen, die zu stark ansteigenden Reibwerten teilweise durch Diffusionsvorgänge führen können. Die ersten Untersuchungen dazu wurden mit Kupfer- und Zink-Beschichtungen gefahren.

Vergleichbare Untersuchungen wurden auch für die reibschlüssigen Druckring-Befestigungen von Mupende durchgeführt. Da in diesem Fall aber die Nabe im Radialschnitt wie ein kurzer Biegebalken zu betrachten ist, dessen Einspannung lediglich durch die Pressfuge gegeben ist, treten bei Überlastung des Ringes „Zugbeanspruchungen“ in der Fügestelle auf. Bei dieser Belastungsart konnten keine positiven Effekte durch die Beschichtungen experimentell ermittelt werden.

3 Längsstift-Verbindungen

Vor dem Hintergrund deutlicher Entwicklungen in der Fertigungstechnik wurde vom IMW vor ca. fünf Jahren die Forschung an Längsstift-Verbindungen als kerbarme Evolutionsvariante der Passfeder aufgenommen, **Bild 4**. Historisch belegte Toleranzprobleme bestehen heute in dieser Form nicht mehr und die Verbindung weißt verschiedene günstige Eigenschaften auf, die von Birkholz erstmalig zusammengetragen und in einen Dimensionierungsvorschlag weiterentwickelt wurden.

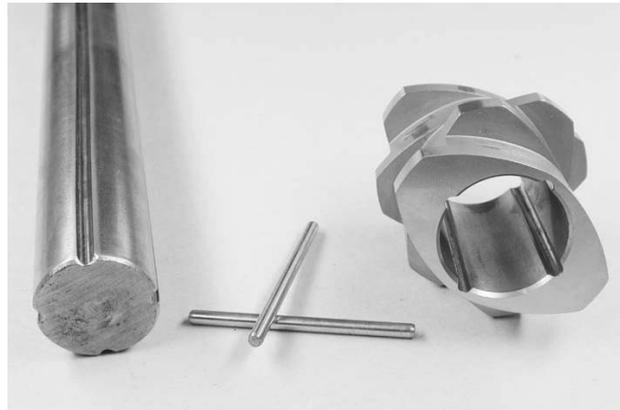


Bild 4: Extrudersegment als Anwendungsfall für die kerbarme Längsstift-Verbindung

Birkholz macht in seinen Ergebnissen Angaben zur sinnvollen Wahl der Anzahl von Längsstiften und gibt in Diagrammform optimale Verhältnisse für die Durchmesser von Längsstift und Fügefläche sowie für die nabenseitigen Stiftüberstände an.

Aktuell laufen zu dieser formschlüssigen Verbindungsart die experimentellen Nachweisuntersuchungen mit getrennter dynamischer Torsions- und Biegebelastung, **Bild 5**. Aufgrund ihrer geringen Kerbwirkung hat auch diese Formschluss-Verbindung, wie die Polygon-Verbindung, das Potential als gemischt form- und reibschlüssige Verbindung mit Übermaß im Zentrierdurchmesser und/oder in der Längsstift-Bohrung ausgeführt zu werden, um die Relativbewegungen als Ursache von Schwingungs-Reibkorrosion zu reduzieren. Die Untersuchungen werden finanziell durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und stehen damit nach Projektabschluss öffentlich zur Verfügung.

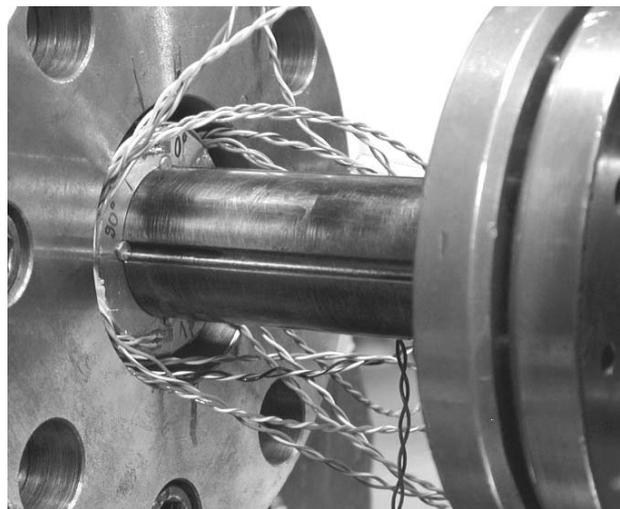


Bild 5: Längsstift-Verbindung mit Messtechnik vorbereitet zur Umlaufbiegeprüfung

4 Zahnwellen-Verbindungen

Der Arbeitsschwerpunkt bei den Welle-Nabe-Verbindungen liegt am IMW auf den Zahnwellen-Verbindungen. Mir ihren vielen Formschlusselementen ist die Zahnwellen-Verbindung eine der leistungsfähigsten Welle-Nabe-Verbindungen. Ihre Übertragungsfähigkeit ist durch die formschlusstypische multiple Kerbwirkung einerseits und durch relativbewegungsinduzierten Verschleiß zwischen Wellen- und Naben-Zahnflanken andererseits limitiert. Diesen beiden Phänomenen sind zwei aktuelle Forschungsvorhaben mit Unterstützung durch die FVA gewidmet. Über diesen Artikel hinaus weiterreichende Informationen zu diesen Themenkomplexen stehen den Mitgliedsfirmen der FVA zur Verfügung

4.1 Kerbwirkung

Die Zahnwellen-Verbindung ist häufig ein Element/Bereich einer ganzen Welle. Aus diesem Verständnis heraus wird in Zusammenarbeit mit dem IMM TU Dresden, das federführend die Überarbeitung der Wellenberechnungsnorm DIN 743 erledigt,



Bild 6: Zahnwellenproben aus statischen Gestaltfestigkeitsversuchen

ein Projekt zur grundlegenden Untersuchung der Kerbwirkung von verschiedenen anwendungstypischen Verzahnungsausläufen und –gestaltungen unter statischen und dynamischen Torsions- oder Biegebelastungen numerisch und experimentell bearbeitet. **Bild 6** zeigt drei verschiedene torsions-

beanspruchte Geometrievarianten und lässt deren Einfluss auf die Kerbwirkung erkennen.

Neben der Gestaltung des Verzahnungsauslaufs werden auch die Verbindungsgröße, die Werkstoffe mit deren Wärmebehandlung und die Verzahnverfahren (spanend/spanlos) experimentell untersucht. Die begleitenden numerischen Simulationen überdecken einen noch größeren Parameterbereich in feinerer Abstufung.

4.2 Verschleiß

Hat man die Verbindung mit Kenntnis des entsprechenden Kerbfaktors auf statische und dynamische Festigkeit rechnerisch ausreichend ausgelegt, so kann dies in der Praxis leider doch noch zu einem verschleißbedingten Ausfall führen. Die Zahnwellen-Verbindung ist eine klassische axial bewegliche Welle-Nabe-Verbindung. Die verschiebenotwendige Tolerierung führt unter den sonstigen Betriebslasten zu verschleißfördernden Relativbewegungen. Sogar reine schwellende Torsionsbelastungen vermögen schon in Verbindung mit der Flankenzentrierung Relativbewegungen zu erzeugen, deren Folge Reibkorrosionsschäden sind, **Bild 7**.



Bild 7: Reibkorrosionsschädigung an einer ungehärteten und ungeschmierten Verbindung bei schwellender Torsionslast

Abhängig von der Amplitudengröße der Relativbewegungen sind alle tribologischen Schädigungsmechanismen zu beobachten und damit relevante Ursachen für eine Lebensdauereinschränkung.

Als Abhilfemaßnahmen bieten sich hier verschiedene Schmiermittel und Flankenbeschichtungen an. Im Rahmen des zweiten aktuell bearbeiteten FVA-Projektes zu Zahnwellen-Verbindungen wurden mehr als 20 verschiedene Verschleißschutzsysteme experimentell untersucht, **Bild 8**. Im Gegensatz zu den früheren Untersuchungen, in denen die Ölschmierungen deutlich besser als die Fette

abschnitten, sind heute Fettschmierstoffe verfügbar, die eine deutliche Verschleißreduzierung ermöglichen. Versuchsbegleitend wurden mögliche Berechnungsansätze zur Verschleiß-Lebensdauervorhersage weiter entwickelt. Kernparameter in der kombinierten experimentell und numerisch bearbeiteten Fragestellung ist die Verschleißintensität pro Umdrehung der Verbindung.

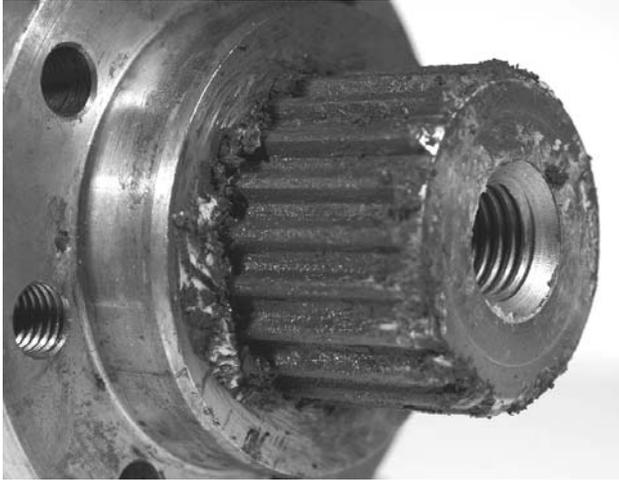


Bild 8: Fettgeschmierte Zahnwellen-Verbindung aus Umlaufbiegeversuch mit überlagerter stat. Torsion ($R_f = 100 \text{ mm}$)

5 Normungsarbeit

Aufbauend auf den Ergebnissen der verschiedenen Forschungsprojekte ist das IMW an der Erstellung und Überarbeitung der korrespondierenden Normenwerke beteiligt.

Innerhalb des ISO Arbeitskreises ISO/TC14 wurde die alte, aus der ANSI 92-2, abgeleitete, ISO 4156 gründlich überarbeitet. Diese Arbeiten fanden mit der Veröffentlichung nach allen internationalen Abstimmungsrunden in diesem Herbst ihren Abschluss. Der betreffende deutsche Arbeitsausschuss im DIN hat einer Annahme für Deutschland zugestimmt und damit steht die ISO 4156 „Straight cylindrical involute splines – metric module, side fit“ auch erstmalig verbindlich für Deutschland zur Verfügung. An der entsprechenden Übersetzung und Einführung als DIN/ISO 4156 wird momentan gearbeitet.

Die Mitarbeit im deutschen Arbeitsausschuss DIN AA 2.1 „Passverzahnungen“ war parallel dazu durch die grundlegende Überarbeitung der DIN 5480 „Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser“ geprägt. Die ehemals 16-teilige Norm wurde in vier Teilen neu aufgebaut, wobei der neue Teil 2 alle Geometrietabellen für die verschiedenen Moduln enthält.

Schwerpunkt der Zuarbeit in diesen Arbeitskreisen stellen die Berechnungsgrundlagen für den Festigkeitsnachweis von Zahnwellen-Verbindungen dar. Nachdem schon vor einigen Jahren der Teil 1 der Berechnungsnorm DIN 5466 „Tragfähigkeitsberechnungen von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen“ zum Weissdruck freigegeben worden ist, ist jetzt auch der zweite Teil DIN 5466-2 aus dem Stand des Gelbdrucks heraus zum Weissdruck freigegeben worden.

Neben den beiden Hauptnormen DIN 5480 und DIN 5466 wurden im DIN AA 2.1 auch die DIN 5464 „Passverzahnungen mit Keiflanken – Schwere Reihe“ durch Hinzufügung der Toleranzauswahlkriterien ergänzt und die DIN 5481 „Passverzahnungen mit Kerbflanken“ unter anwendungsspezifischen Gesichtspunkten überarbeitet. Die aktuellen Fragestellungen betreffen jetzt die existierende Norm DIN/ISO 14 „Keilwellen-Verbindungen mit geraden Flanken und Innenzentrierung“, hier besteht noch Diskussionsbedarf im Arbeitsausschuss. Wer sich von diesen Themen angesprochen fühlt kann sich an Herrn Hagemann beim VDMA in Frankfurt oder auch gerne an den Autor dieses Artikels wenden.

6 Zusammenfassung

Das IMW ist mit seinem wichtigen Arbeitsgebiet der Welle-Nabe-Verbindungen spezialisiert auf teilplastifizierte reibschlüssige Pressverbindungen und die formschlüssige Zahnwellen-Verbindung. Ergänzend wird die kerbbarme Längsstift-Verbindung untersucht. Im auslaufenden Jahr konnten zu verschiedenen Fragestellungen aus diesem Bereich praxisrelevante Forschungsergebnisse erarbeitet werden und an die Projektpartner oder in die Normen weitergegeben werden. Teilweise konnten die erreichten Ergebnisse in diesem Artikel nicht mit der aus den Forschungsarbeiten vorliegenden Präzision in den Aussagen dargestellt werden, da abhängig vom Drittmittelgeber abgestufte Veröffentlichungspflichten gelten. Wir möchten uns bei dieser Gelegenheit bei unseren beiden großen Fördermittelgebern der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsförderung (AiF) mit Ihrer Mitgliedsvereinigung Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) für die solide Forschungsförderung bedanken.