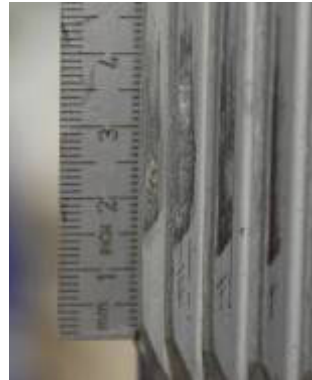


Zum Verschleiß in Längenausgleichen von Kreuzgelenkwellen

Lau, P.

Der während des Betriebs von Kreuzgelenkwellen auftretende Verschleiß im verzahnten Längenausgleich stellt einen entscheidenden Faktor für die zulässige Einsatzdauer dar. Erreicht das verschleißbedingt wachsende Knickspiel eine kritische Größe ist die anforderungsgerechte Funktionserfüllung nicht mehr gegeben und es wird ein Austausch erforderlich. Die Berücksichtigung dieser Verschleißentwicklung bei der Auslegung fußt momentan nur auf Erfahrungs- oder Schätzwerten. Ein am IMW bearbeitetes Forschungsvorhaben schafft hier Abhilfe: an seinem Ende steht eine Auslegungsrichtlinie, die dem Konstrukteur eine genauere analytische Betrachtung des zu erwartenden Verschleißes ermöglicht.



Due to the intended employment of cardan shafts the splined shaft connections in their midsections are subject to successive wear. This wear poses the crucial factor for the allowable application of these shafts. Reaches the buckling play of the length compensation, which increases in consequence of the growing wear, a critical extent the appropriate compliance to its specification is not given any more. Then a replacement becomes necessary. Taking into account this wear in the dimensioning process happens at present just based on experience or estimation. An ongoing research project at the Institute of Mechanical Engineering targets improvement regarding this subject: as a result a guideline will be created enabling the design engineer to take the expected wear into his consideration.

1 Das Vorhaben

Ein Tätigkeitsfeld des Vorhabens bilden umfangreiche experimentelle Untersuchungen an zwei Baugrößen bei unterschiedlichen Lastsituationen. Dabei wurden hinsichtlich der Verbindungspartner im Längenausgleich drei verschiedene Überdeckungsängen, gängige Material- bzw. Reibpaarungen, zwei Verzahnungsgeometrievarianten wie auch unterschiedliche Fertigungsverfahren im Versuchsplan berücksichtigt.

Daneben finden numerische Untersuchungen statt, die in einem ersten Schritt die experimentell untersuchten Versuchsteile in den gefahrenen Lastsituationen betrachten. Dies dient der Bestimmung des Zusammenhangs zwischen den numerisch ermittelten Beanspruchungen und dem experimentell bestimmten Verschleißverhalten. In einem zweiten Schritt werden die numerischen Untersuchungen dann auf andere Baugrößen erweitert. Ausgehend von den dadurch erhaltenen Beanspruchungen lassen sich mit Hilfe des o. a. festgestellten Zusammenhangs Aussagen über den erwartbaren Verschleiß machen.

Nachdem das Vorhaben als Ganzes bereits in der Vergangenheit im Überblick vorgestellt wurde, werden im Folgenden Teilergebnisse aus dem Bereich der experimentellen und der numerischen Untersuchungen an der kleinen Baugröße (Längenausgleich nach DIN 5480: 32x2x14 /1/) herausgegriffen und vorgestellt.

1.1 Experimentelle Untersuchungen (kleine Baugröße)

Zum Erzielen aussagekräftiger Ergebnisse bei vertretbarem Zeitaufwand ging die ursprüngliche Planung für sämtliche experimentellen Untersuchungen von einer permanenten Verspannung der GW (Gelenkwellen) während der Versuche mit Verschiebung im LA (Längenausgleich) aus. Bezüglich der Versuche, die GW mit Stahl-Rilsan-Reibpaarung (Welle/Nabe) im verzahnten LA zum Gegenstand hatten, ließ sich diese Planung auch so umsetzen. **Bild 1** zeigt die gemessenen Knickspielentwicklungen bei den drei betrachteten Überdeckungs-längenvarianten ($0,8\text{-}d_B$, $1,5\text{-}d_B$ und $3,0\text{-}d_B$). Hervorzuheben ist hier die klare Stufung der Steigerungsraten in Abhängigkeit von der Überdeckungs-länge und parallel die lineare Entwicklung der Knickspielwerte nach Erreichen von $1 \cdot 10^6$ Umdrehungen – also dort, wo der Einlauf als abgeschlossen betrachtet werden kann.

Im Gegensatz dazu zeigte sich bei den Versuchen mit der alternativen Paarung nitrierter Stahl/Stahl in der Welle-Nabe-Verbindung des LA bereits nach wenigen Minuten eine Abnahme der realisierten Verschiebewege. Eine genauere Betrachtung zeigte, dass der Grund hierfür in einem stetigen Anstieg der Reibkräfte unter permanenter Verspannung lag. Im Extremfall bedeutete dies, dass die über eine Exzentervorrichtung axial in die Gelenkwellen eingeleiteten Verschiebekräfte nicht mehr zur Verschiebung im LA ausreichten, sondern nur zur elastischen Verformung der Anschlussbauteile führten. Nachdem sich Fertigungsfehler als Ursache ausschließen ließen und außerdem ein Effekt des Zurücksetzens der Reibkräfte durch Wegnahme des Verspannmoments festgestellt wurde, wurde die Verspanncharakteristik für diese Materialpaarung dementsprechend angepasst: alle 60 Se-

kunden Versuchsbetrieb wurde die Verspannung für 5 Sekunden weggeschaltet (Fahrweise 60/5). Das Ergebnis der vorstehend beschriebenen Versuche ist in **Bild 2** wiedergegeben. Auch hier haben die vorstehend getroffenen Aussagen zur Stufung und Linearität Gültigkeit.

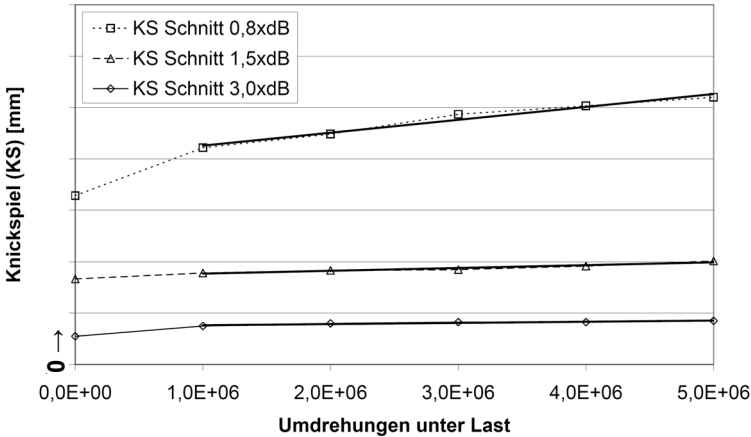


Bild 1: Knickspiel in Abhängigkeit von der Versuchsumdrehungszahl (Stahl/Rilsan, 0,8-d_B, 1,5-d_B und 3,0-d_B, M_t=500Nm, Verschiebung 1 mm bei 1 Hz, permanent verspannt)

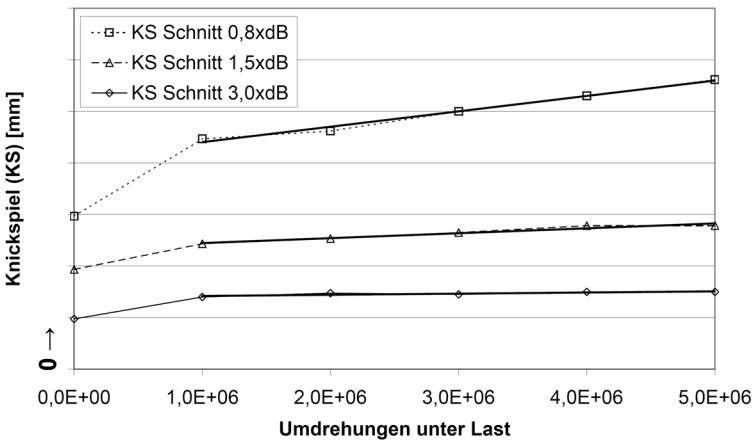


Bild 2: Knickspiel in Abhängigkeit von der Versuchsumdrehungszahl (nitr. Stahl/Stahl, 0,8-d_B, 1,5-d_B und 3,0-d_B, M_t=500Nm, Verschiebung 1 mm bei 1 Hz, Fahrweise 60/5)

Um die mit den unterschiedlichen Verspannungscharakteristika erhaltenen Untersuchungsergebnisse miteinander in Relation setzen zu können, wurde der Versuchsplan nachfolgend durch Versuche mit unterbrochener Verspannung an GW mit Stahl-Rilsan-Reibpaarung ergänzt, wobei sich die in **Bild 3** dargestellten Verläufe ergaben. Im Vergleich zu **Bild 1**, in dem die Knickspiele im LA der permanent verspannt gefahrenen GW (gleicher Ausführung) wiedergegeben sind, zeigt sich eine erhebliche Senkung der Knickspielzunahmen über die Versuchsdauer trotz gleicher Umdrehungszahlen unter Verspannung. Dies verdeutlicht den nicht vernachlässigbaren Einfluss der Fahrweise auf die Verschleißkennwertentwicklung. Ein sinnvoller direkter Vergleich zwischen den beiden unterschiedlichen Materialpaarungen kann nur auf Basis von **Bild 2** und **Bild 3** erfolgen. Dabei ergibt sich die klare Überlegenheit der Materialpaarung Stahl/Rilsan: auch bei Einkürzung der Überdeckungslänge auf $0,8 \cdot d_B$ treten hier nur Steigerungsraten auf, die bei der Paarung nitrierter Stahl/Stahl erst bei Überdeckungsängen oberhalb von $1,5 \cdot d_B$ erreicht werden.

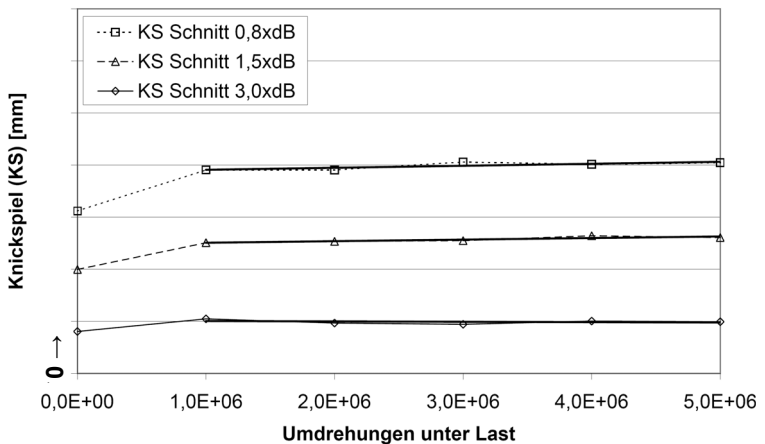


Bild 3: Knickspiel in Abhängigkeit von der Versuchsumdrehungszahl (Stahl/Rilsan, $0,8 \cdot d_B$, $1,5 \cdot d_B$ und $3,0 \cdot d_B$, $M_t=500\text{Nm}$, Verschiebung 1 mm bei 1 Hz, Fahrweise 60/5)

Gerade in Fahrzeugen eingesetzte Gelenkwellen erreichen im Laufe ihrer Nutzungsdauer Umdrehungszahlen, die deutlich jenseits der für die Versuche festgesetzten Endumdrehungszahl von $5 \cdot 10^6$ liegen. Diese Tatsache und der Umstand, dass die in den Untersuchungen aufgetretenen Knickspielentwicklungen nach dem Einlauf durchweg ein lineares Verhalten aufwiesen, führten zu der Frage welchen (Um-

drehungszahl-)Beschränkungen der Geltungsbereich einer von linearen Verschleißkennwertentwicklungen ausgehenden Auslegungsrichtlinie unterliegt. Um hier eine Aussage treffen zu können, wurde einer der Versuche, der die Untersuchung der Materialpaarung Stahl/Rilsan bei unterbrochener Verspannung zum Gegenstand hatte, bis zum zehnfachen der eigentlich vorgesehenen Dauer fortgeführt (bis etwa 900h unter Last). Das Ergebnis ist in **Bild 4** dargestellt.

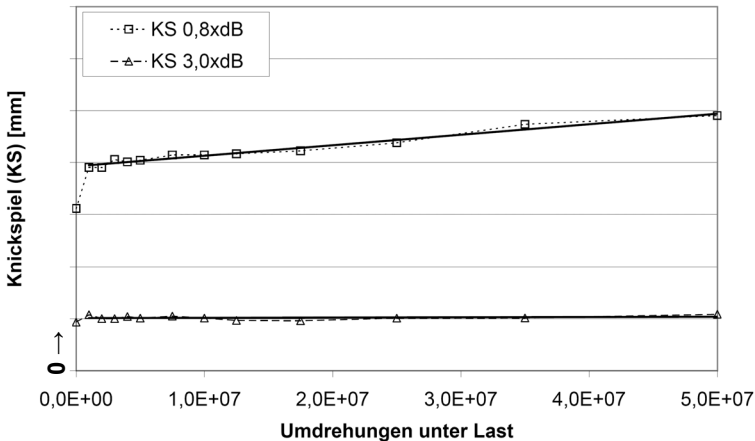


Bild 4: Knickspiel in Abhängigkeit von der Versuchsumdrehungszahl (Stahl/Rilsan, 0,8-d_B und 3,0-d_B, M_T=500Nm, Verschiebung 1 mm bei 1 Hz, Fahrweise 60/5, fortgeführt bis 5x10⁷ Umdrehungen)

Es ersichtlich, dass sich das bereits in den bisherigen Ergebnissen erkennbare lineare Verhalten der Knickspielentwicklung auch bei erheblich verlängerter Versuchsdauer nicht ändert. Es tritt also noch keine gesteigerte Verschleißrate im Sinne eines Endverschleißes auf.

1.2 Numerische Untersuchungen (kleine Baugröße)

Die numerischen Untersuchungen nutzen als Ausgangspunkt ein Vollmodell des LA mit idealer, spielfreier Verzahnung und wurden davon ausgehend Schritt für Schritt der Realität angenähert, so dass jetzt Modelle vorliegen in denen die unterschiedlichen Überdeckungs-längen, die vorhandenen Teilungsabweichungen, die Fußvollausrundungen der gewalzten Wellenverzahnung und auch die Rilsansicht berücksichtigt sind. Stellt man die an diesen Modellen numerisch be-

stimmten Flächenpressungen an den drei experimentell betrachteten Überdeckungsängen am Beispiel der Materialpaarung Stahl/Rilsan für den Fall des reinen Drehmoments ($M_t=500\text{Nm}$) einander gegenüber, ergeben sich die in **Bild 5** dargestellten Verläufe.

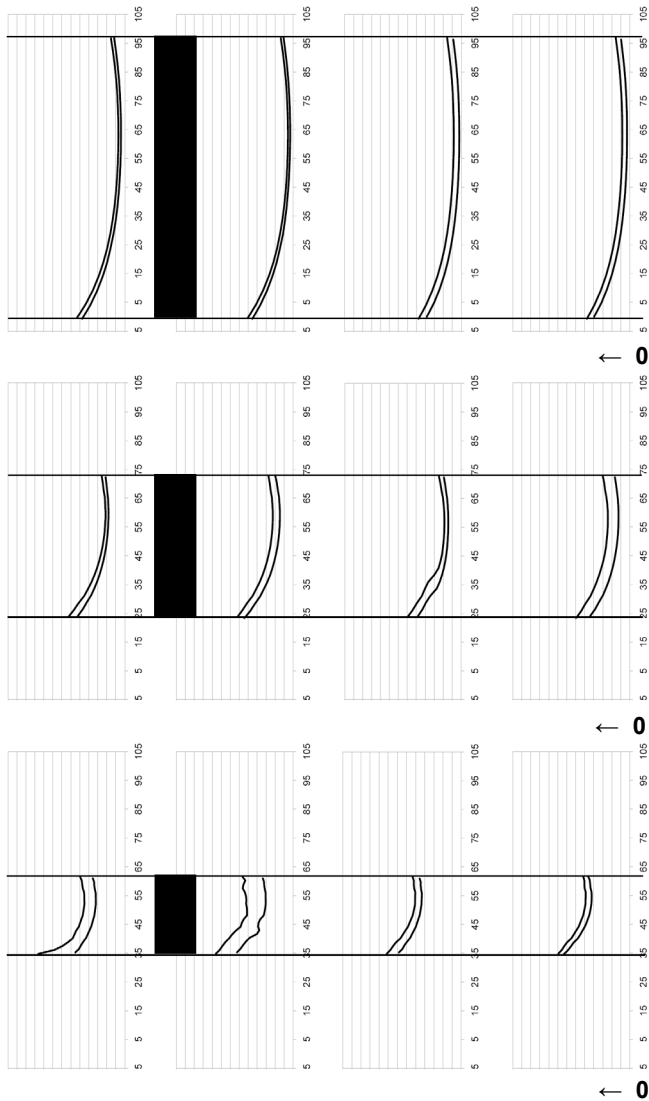


Bild 5: Flächenpressungsverläufe über der Verbindungslänge (von oben: max. belasteter Zahn, +90°, +180°, +270°), zwei Linien: Flankenmaximum und Flankenmitte, in schwarz veranschaulicht: Überdeckungsängen $0,8 \cdot d_b$, $1,5 \cdot d_b$ und $3,0 \cdot d_b$, Stahl/Rilsan, $M_t=500\text{Nm}$

Es lässt sich zum einen der Effekt des Kantentragens mit zunehmender Überhöhung der Flächenpressung zum Verbindungsrand hin bei abnehmender Überdeckungslänge beobachten. Zum anderen zeigen sich die Auswirkungen der Teilungsfehler, die zu unterschiedlich hohen Beanspruchungen über den Umfang führt.

Nimmt man in einem weiteren Schritt zum Drehmoment noch die aus der Ungleichförmigkeit des Übertragungsverhaltens der Kreuzgelenke (Anm.: bei Beugung der GW um 10°) herrührende maximale Biegebelastung in Höhe von $M_b=90$ Nm hinzu, ergibt sich **Bild 6**: abhängig von der Position des betrachteten Zahns auf dem Umfang bzw. von der axialen Position auf der Zahnflanke (Drehmomentein- oder -ausleitungsseite) erhöhen oder vermindern sich die Flächenpressungswerte aufgrund der Überlagerung von Torsion und Biegemoment – die Verläufe kippen nach links bzw. nach rechts weg.

Die in diesen Verläufen ablesbaren Werte für die Beanspruchung bilden nun zusammen mit den im vorigen Abschnitt grafisch dargestellten Verschleißkennwertzunahmen die Eingangsgrößen für die Erstellung des eingangs erwähnten Zusammenhangs auf dessen Basis aktuell die Variationsrechnungen zur Erweiterung des Betrachtungsreiches stattfinden.

2 Zusammenfassung

Unter Verweis auf die grundlegende Zielsetzung des aktuell im IMW bearbeiteten Vorhabens werden Teilergebnisse aus den beiden Haupttätigkeitsfeldern, nämlich den experimentellen und den numerischen Untersuchungen vorgestellt. So wird u. a. der Einfluss der Überdeckungslänge auf die Knickspielentwicklung bei zwei betrachteten Reibpaarungen aufgezeigt und der lineare Charakter der Knickspielzunahme am Beispiel der Paarung Stahl/Rilsan auch über einen vergrößerten Betrachtungszeitraum nachgewiesen. Diesen Ergebnissen werden außerdem solche aus dem numerischen Bereich zur Seite gestellt, die die im LA einer GW herrschenden Beanspruchungen aufzeigen und so helfen die vorstehenden Ergebnisse aus dem experimentellen Bereich nachzuvollziehen.

3 Literatur

- /1/ DIN 5480, Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, 2006.

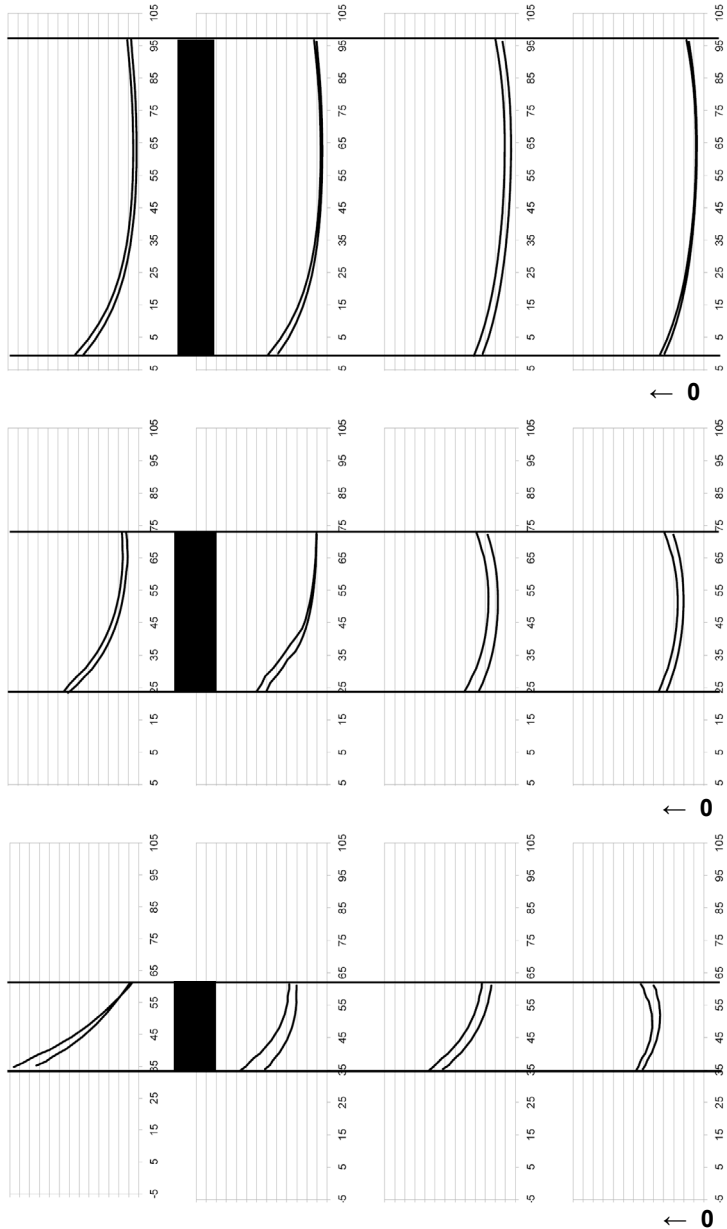


Bild 6: Flächenpressungsverläufe über der Verbindungslänge (von oben: max. belasteter Zahn, +90°, +180°, +270°), zwei Linien: Flankenmaximum und Flankenmitte, in schwarz veranschaulicht: Überdeckungs-längen $0,8 \cdot d_B$, $1,5 \cdot d_B$ und $3,0 \cdot d_B$, Stahl/Rilsan, $M_t=500\text{Nm}$, $M_b=90\text{Nm}$