

Über die Untersuchungen an Gelenkwellen-Längenausgleichen



Lau, P.

Forschung an Welle-Nabe-Verbindungen ist bereits seit langem einer der Schwerpunkte am IMW. So wurden insbesondere Zahn- und Keilwellenverbindungen sehr intensiv betrachtet, was u. a. in der Entwicklung einer zugehörigen Berechnungsvorschrift mündete. Aktuell werden nun im Zuge eines Forschungsvorhabens eben solche Verbindungen untersucht, die allerdings jenseits der in der Vorschrift genannten geometrischen Empfehlungen und Gültigkeitsgrenzen liegen: umlaufende, verzahnte Längenausgleiche in der Zwischenwelle von Kreuzgelenkwellen.

Shaft-hub connections are one of the main research areas at the Institute of Mechanical Engineering for a long time. Beneath this especially splined shaft connections have been subject to intensive analyses, which amongst others finally resulted in a construction rule. At the moment one special kind of these connections is subject of an ongoing research project again, since the rule is not valid for its specific demands. These splined shaft connections are to be found in the revolving length compensations in the midsection of cardan shafts.

1 Wissenschaftliche Problemstellung

Kreuzgelenkwellen findet man beispielsweise in Radantrieben von Straßen- oder Schienenfahrzeugen, wo sie die Verbindung zwischen fest im Fahrzeugrahmen verbauten Motoren und den beweglich im Fahrgestell integrierten Antriebsachsen herstellen. Ihre Hauptfunktion ist die Übertragung von Drehmomenten, bei gleichzeitigem Ausgleich von Axial- und Radialverlagerungen. Um diese im Betrieb zu ermöglichen, wird für den axialen Ausgleich ein Längenausgleich in der Zwischenwelle genutzt. Dieser Längenausgleich, der vielfach in Form einer Zahnwellen-Verbindung ausgeführt ist, weist in der Regel eine Verzahnung mit Evolventenprofil nach DIN5480 /1/ auf.

Treten im Betrieb die o. a. Verlagerungen auf, ergeben sich im Längenausgleich neben den axialen auch radiale Relativbewegungen, die beide in Abhängigkeit von den Reibungseigenschaften (Schmierung)

zu einem Verschleiß und einer damit verbundenen Spielzunahme führen. Mit zunehmender Betriebsdauer ergeben sich daraus unzulässige Knickspiele und Unwuchtkräfte, die letztlich einen Austausch erforderlich werden lassen oder zum Ausfall führen.

Um es im Rahmen der gestellten Anforderungen nicht soweit kommen zu lassen, ist eine Berücksichtigung des im Betrieb auftretenden Verschleißes während des Auslegungprozesses notwendig. In der Gegenwart geschieht dies zumeist auf Basis von firmeninternen Erfahrungen. Sind diese nicht in ausreichendem Umfang vorhanden, orientiert man sich z. T. auch rein am fertigungstechnisch Machbaren (Maximierung der gemeinsamen Verzahnungslänge von Welle und Nabe).

Hier setzt ein am IMW bearbeitetes Forschungsvorhaben an: Es hat das Ziel eine Richtlinie für die verschleißoptimierte Auslegung von verzahnten Längenausgleichen bei Kreuzgelenkwellen zur erarbeiten. Die Grundlage hierfür bilden umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen, deren Ergebnisse aktuell zusammengeführt werden, um auf dieser Basis verlässliche Aussagen über das Verschleißverhalten treffen zu können.

1.1 Experimentelle Untersuchungen

Gegenstand der experimentellen Untersuchungen sind GW (Gelenkwellen) zweier verschiedener Baugrößen, die größenordnungsmäßig dem LKW-Bereich bzw. dem Schienenfahrzeugbereich zuzuordnen sind. Ihre Längenausgleiche sind mit Evolventenverzahnungen nach DIN 5480 ausgeführt und haben Bezugsdurchmesser von $d_b = 32$ mm bzw. $d_b = 90$ mm.

Die Wellen werden auf zwei Prüfständen untersucht, die beide das Verspannprinzip nutzen. In den Untersuchungen werden so umlaufende Leistungen von 52 kW bzw. 565 kW realisiert, wobei die Versuchsdrehmomente etwa im Verhältnis 20 stehen.

Die wichtigsten, neben der Baugröße variierten, Untersuchungs- und Versuchsteilparameter sind:

- die Überdeckungslänge $b = 0,8 \cdot d_b$, $1,5 \cdot d_b$ bzw. $3,0 \cdot d_b$,
- die Material(Reib)-paarung im Längenausgleich (Welle/Nabe) Stahl/Rilsan bzw. Stahl/Stahl,
- die Verschiebewege und -geschwindigkeiten im LA (Längenausgleich) und
- optionale statische und dynamische Querkräfte.

Anmerkung: Rilsan, genauer gesagt Rilsan B, ist ein Handelsname für einen Kunststoff der Sorte PA11 (Polyamid 11). Er wird speziell im Bereich mechanisch beanspruchter Bauteile eingesetzt, im vorliegenden Fall als Beschichtungsmaterial auf den Zahnflanken von Längenausgleichen. Es hat die positive Eigenschaft den Reibbeiwert, ausgehend von einer Stahl-Stahl-Reibpaarung um etwa ein Drittel – jeweils im gefetteten Zustand – herabzusetzen.

Zur Quantifizierung des Verschleißes werden in den Untersuchungen, beginnend mit der Startmessung bei 0 Umdrehungen bis zur Endmessung bei $5 \cdot 10^6$ Umdrehungen alle $1 \cdot 10^6$ Umdrehungen die Verschleißkennwerte, respektive das Knick- und das Verdrehspiel der GW gemessen. Fasst man nun die Verschleißkennwerte sämtlicher GW mit identischen Untersuchungs- und Versuchsteilparametern zusammen und trägt sie über der Umdrehungszahl auf, lassen sich sehr gut Vergleiche z. B. zwischen GW mit verschiedenen langen gemeinsamen Verzahnungslängen von Welle und Nabe anstellen. So erlaubt **Bild 1** den Vergleich der Knickspielentwicklung am Beispiel von Versuchsteilen der kleinen Baugröße mit der Materialpaarung Stahl/Rilsan im Längenausgleich in den Überdeckungsängen $3,0 \cdot d_b$, $1,5 \cdot d_b$ und $0,8 \cdot d_b$.

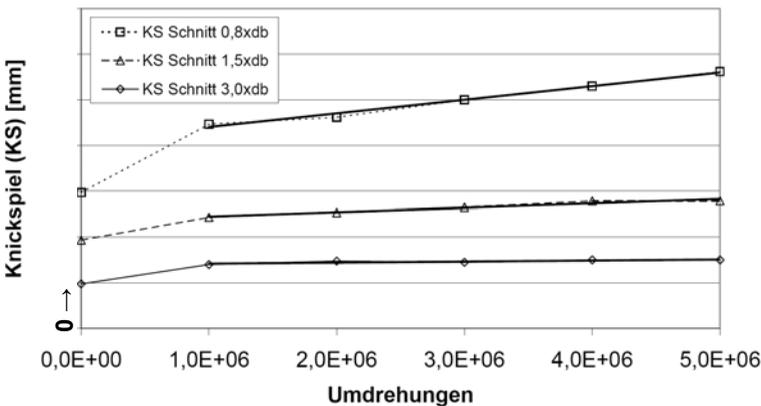


Bild 1: Knickspiel in Abhängigkeit von der Versuchsumdrehungszahl (Stahl/Rilsan, $0,8 \cdot d_b$, $1,5 \cdot d_b$ und $3,0 \cdot d_b$, ± 1 mm bei 1 Hz)

Die Anzahl der zugrunde liegenden GW beträgt dabei: $3,0 \cdot d_b$ / $1,5 \cdot d_b$ / $0,8 \cdot d_b = 2 / 3 / 3$. Weitere Untersuchungsparameter waren: Beugungswinkel $\beta = 10^\circ$, $M = 500$ Nm, $n = 1000$ U/min, bis Versuchsumdrehungszahl $5 \cdot 10^6$, $F_Q = 0$ N, Verschiebung: ± 1 mm bei 1 Hz. Im Ergebnis zeigt sich in den hier dargestellten Verläufen deutlich die

Abhängigkeit der Knickspielzunahme von der Überdeckungslänge im LA bei steigender Versuchsumdrehungszahl. Unter Berücksichtigung der Untersuchungsparameter gilt: je kürzer die Überdeckung desto stärker steigt das Knickspiel. Dieser Sachverhalt wird beim Vergleich der Steigungen der (linearen) Regressionsgeraden (Spannweite von $1 \cdot 10^6$ bis $5 \cdot 10^6$) deutlich und hat ebenfalls Gültigkeit für die GW mit der Materialpaarung Stahl/Stahl im LA (hier nicht abgebildet).

Hier sei betont, dass das Knickspiel grundsätzlich nicht nur den empfindlicheren Messwert bei auftretendem Verschleiß darstellt, sondern auch das entscheidende Kriterium hinsichtlich der Auslegung ist. Die im Betrieb ebenfalls auftretende Verdrehspielsteigerung ist hinsichtlich der Funktionserfüllung und des störungsfreien Betriebs nachrangig. **Bild 2** zeigt das Verhalten der Verdrehspiele der bereits in **Bild 1** behandelten GW: nur das Verdrehspiel der kürzesten Überdeckungsausführung ($0,8 \cdot d_b$) steigt deutlich an. Die beiden anderen Überdeckungslängen zeigen nur einen sehr kleinen Anstieg in der gleichen Größenordnung.

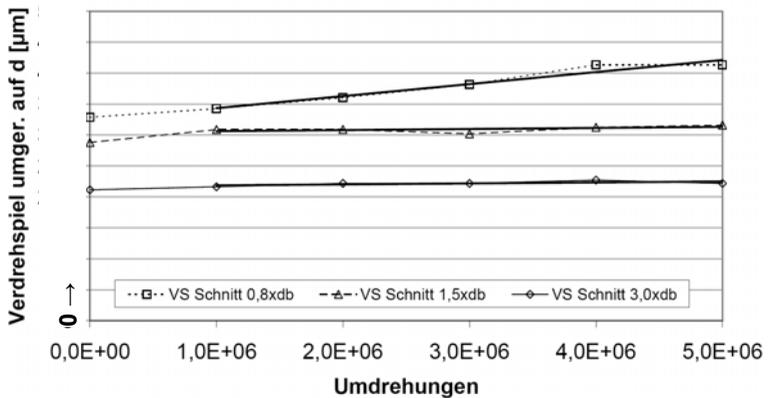


Bild 2: Verdrehspiel in Abhängigkeit von der Versuchsumdrehungszahl (Stahl/Rilsan, $0,8 \cdot d_b$, $1,5 \cdot d_b$ und $3,0 \cdot d_b$, ± 1 mm bei 1 Hz)

Sowohl bei den Knick- als auch bei den Verdrehspielen liegen die nach der Einlaufphase, die bei $1 \cdot 10^6$ Umdrehungen als abgeschlossen betrachtet werden kann, aufgetretenen Messwerte auch bei den anderen Untersuchungsergebnissen mit geringen Abweichungen auf einer Geraden. Dies zeigt, dass die von Kragelski in [2] dargestellte typische Abhängigkeit des Verschleißes von der Reibdauer im Fall des Längenausgleichs gegeben ist, wonach dem Stadium des Einlaufs (I) das Stadium der gleichmäßigen Abtragung (II) folgt (**Bild 3**).

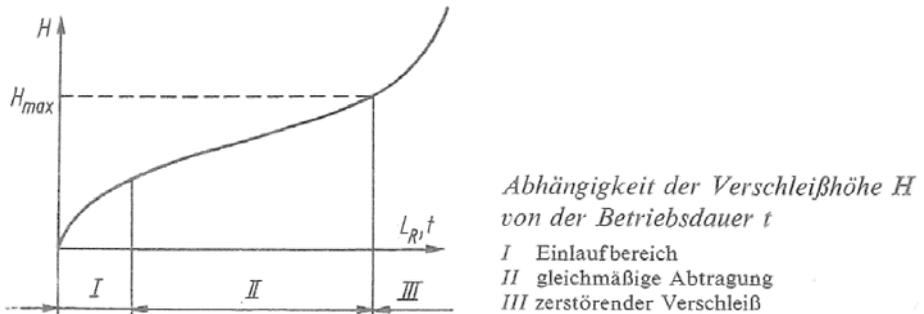


Bild 3: Die Abhängigkeit des Verschleißes von der Reibdauer $/2/$

Eine über die reguläre Versuchslaufdauer von $5 \cdot 10^6$ Umdrehungen hinausgehender Stichversuch bis $1 \cdot 10^7$ Umdrehungen hat ergeben, dass auch in diesem Bereich das Stadium der gleichmäßigen Abtragung noch nicht verlassen wird – auch hier zeigen die Verschleißkennwerte noch ein näherungsweise lineares Verhalten.

2 Theoretische Untersuchungen

Zu Beginn der theoretischen Untersuchungen wurden die ersten Berechnungen an Bauteilen mit abweichungsfreien Verzahnungen ohne Beschichtung angestellt. In den folgenden Iterationsschleifen fand dann eine schrittweise Annäherung an die realen Bauteile statt. So wurden nacheinander u. a. das Spiel und die Teilungsabweichungen der Verzahnungen, sowie die volle Fußausrundung bei den gewalzten Wellenverzahnungen und die nabenseitige Rilsanbeschichtung der Zähne in die entsprechenden, den Berechnungen zugrunde liegenden Modelle integriert.

Nachdem zwischenzeitlich Unklarheiten bezüglich der für das Rilsan anzusetzenden Materialkennwerte auftauchten und diese auch nicht mit Hilfe des Herstellers ausgeräumt werden konnten, wurde eine eigene Untersuchung zum Verformungsverhalten unter Druckbelastung angestellt. Dabei wurde ein im Bereich der Berührfläche kugelig geformter Stempel mit verschiedenen Lasten auf eine Stahlplatte gepresst, die eine Rilsanschicht gleicher Dicke wie die Zähne der Längenausgleichsnabe aufwies. Während der Untersuchung wurden die erreichten Eindringtiefen und die zugehörigen Kräfte gemessen. Die so erhaltenen Verläufe sind in **Bild 4** dargestellt.

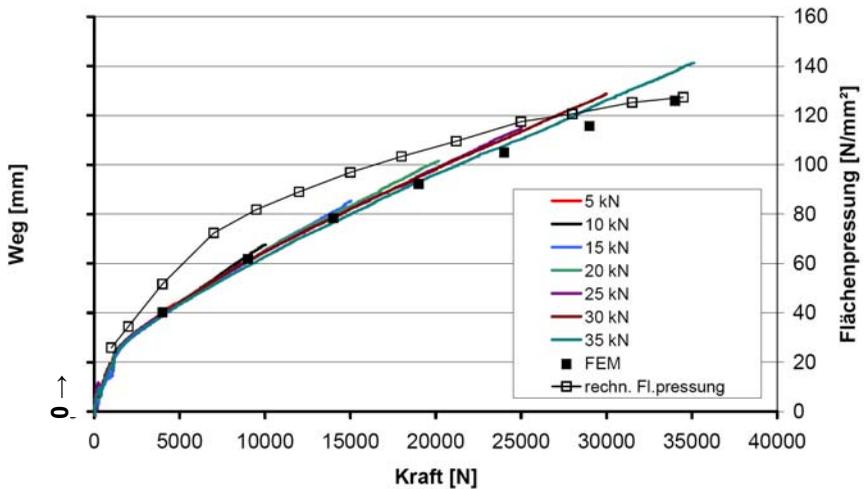


Bild 4: Eindringtiefe-Kraft-Verläufe aus den Druckstempeluntersuchungen, per FEM-Berechnung ermittelte Eindringtiefen und analytisch bestimmte Flächenpressungen

Nach anschließender Abbildung des Versuchsaufbaus in einem FEM-Modell, wurde dann das vorliegende Werkstoffverhaltens iterativ bestimmt. Im Ergebnis wurde die beste Übereinstimmung auf Basis eines idealelastischen Modells mit einem recht niedrigen Elastizitätsmodul erreicht. Die auf dieser Basis per FEM rechnerisch ermittelten Eindringtiefen des Stempels sind als schwarz gefüllte Quadrate in **Bild 4** eingetragen. Daneben enthält das Diagramm noch die Kurve der analytisch bestimmten Flächenpressungswerte, die die Kraft und die projizierte Kontaktfläche in Beziehung setzen (ungefüllte Quadrate). Das auf diese Weise qualitativ und quantitativ verifizierte Materialmodell konnte im Folgenden dann für die erforderlichen FEM-Berechnungen genutzt werden.

In den anschließend neu durchgeführten Berechnungen wurden dann sämtliche in den experimentellen Untersuchungen gefahrenen Lastsituationen mit Längenausgleichen der Materialpaarung Stahl/Rilsan betrachtet. **Bild 5** gibt exemplarisch die bezüglich Flächenpressung ausgewerteten Ergebnisse einer dieser Berechnungen wieder. Gegenstand war hier eine GW mit der Materialpaarung Stahl/Rilsan in der Überdeckungslänge $0,8 \cdot d_b$, die einer Kombination von Versuchsrehmoment ($M = 500 \text{ Nm}$) und Biegemoment ($M_b = 90 \text{ Nm}$) unterlag. (Anmerkung: Dieses maximale Biegemoment hat seinen Ursprung im ungleichförmigen Übertragungsverhalten der Kreuzgelenke.)

Neben der Größenordnung der Beanspruchungen lässt sich in den Berechnungsergebnissen die an den Verbindungsrandern vorliegende Flächenpressungsüberhöhung gut erkennen. Die Maximalbelastung liegt hier auf der Drehmomenteinleitungsseite und ist durch den dunkelblauen Bereich (Druckbelastung negativ) gekennzeichnet.

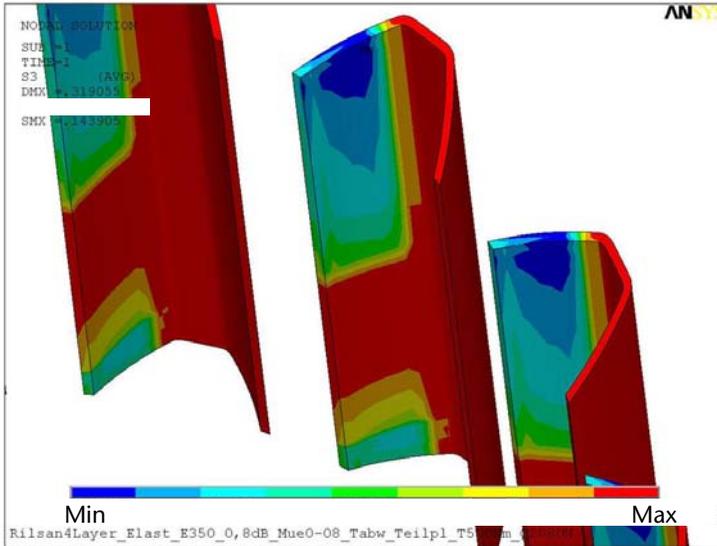


Bild 5: Rilsanschnitt mit abgesetzten Flächenpressungsbereichen (Stahl/Rilsan, 0,8-dB, $T = 500\text{Nm}$, $M_b = 90\text{Nm}$)

3 Zusammenführung der Ergebnisse

Mit Vorliegen der Ergebnisse aus beiden Untersuchungsbereichen kann dann eine Zusammenführung stattfinden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass insbesondere die an den Verbindungsrandern herrschende Flächenpressung für die Knickspielsteigerung verantwortlich ist. Mit der Zusammenführung der z. T. vorstehenden Ergebnisse für GW mit Längenausgleich in Stahl/Rilsan-Materialpaarung in den verschiedenen Überdeckungslängen ergibt sich das in **Bild 6** dargestellte Bild. Auf der y-Achse sind dabei die Werte der Regressionsgeradensteigungen aus der Auswertung der experimentellen Untersuchungen angetragen, auf der x-Achse die der relevanten Flächenpressungswerte aus den FEM-Berechnungen. Die im Diagramm angegebenen Spannweiten kennzeichnen Unsicherheiten aufgrund etwaiger Ablesungenauigkeiten. Insgesamt betrachtet, zeigt sich so ein exponentieller Zusammenhang zwischen Flächenpressung und Knickspiel-

zunahme, der hier durch eine entsprechende Regressionslinie visualisiert wird. Diese Abhängigkeit wird letztlich, neben anderen festgestellten Zusammenhängen, Eingang in die zu erstellende Auslegungsrichtlinie finden.

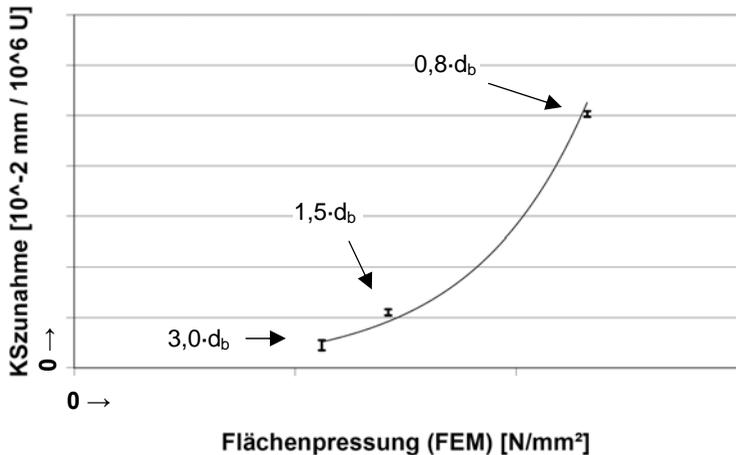


Bild 6: Knickspielzunahme (exp. Untersuchungen) über Flächenpressung (FEM) an Längenausgleichen von GW (Stahl/Rilsan, 0,8-db, 1,5-db und 3,0-db, +/-1 mm bei 1 Hz)

4 Zusammenfassung

Ausgehend von der wissenschaftlichen Problemstellung, in der die Verschleißproblematik im Längenausgleich von Kreuzgelenkwellen umrissen wird, schildert der Artikel die angewendete Vorgehensweise für die Erstellung einer geeigneten Auslegungsrichtlinie. Diese Vorgehensweise wird dabei exemplarisch am Beispiel von GW mit Längenausgleichen in der Materialpaarung Stahl/Rilsan mit den zugehörigen Untersuchungsergebnissen umgesetzt, um zum Ende einen Zusammenhang für den betrachteten Untersuchungsbereich herzustellen, der neben anderen in die Richtlinie einfließen wird.

5 Literatur

- /1/ DIN 5480, Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, 2006.
- /2/ Kragelski, I. V., Dobycyn, N., Komalov, V. S.: Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß. Carl Hanser Verlag, München, 1983.