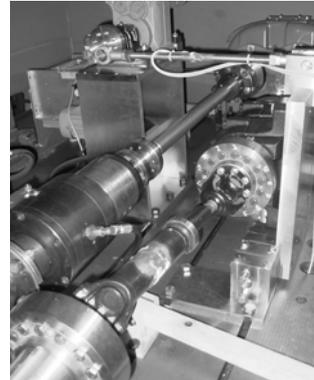


Die Zahnwellen-Verbindung einmal anders: im Längenausgleich von Gelenkwellen (FVA-Vorhaben 505)

Lau, P.; Schäfer, G.



Nachdem Zahnwellen-Verbindungen bereits in der Vergangenheit einer der Forschungsschwerpunkte am IMW waren, wird auch jetzt wieder ein Forschungsvorhaben in diesem Bereich bearbeitet. Es beschäftigt sich mit den umlaufenden Längenausgleichen im Mittelteil von Kreuzgelenkwellen, wo eine ungleichförmige Drehbewegung für dynamische Biege- und Torsionsbelastung führt.

Since splined shaft connections in the past have already been one of our main research areas once again an associated research project is carried out at the Institute of Mechanical Engineering. It deals with the revolving length compensations in the midsection of cardan shafts, where an uneven rotation causes dynamical bending and torsional loads.

1 Ausgangssituation, Zielsetzung und -erreichung

Schadensanalysen an Gelenkwellen mit verzahntem Längenausgleich zeigen, dass der häufigste Grund von Ausfällen der Verschleiß in eben diesem Längenausgleich durch Reibkorrosion und weitere Formen von Abrasivverschleiß ist. Die zugehörige Kausalitätskette stellt sich wie folgt dar: Verschleiß an den Flanken → Spiel in der Verbindung → gesteigertes Knickspiel, Vibrationen und erhöhte Unwucht. Bei Nichtbeachtung dieser Warnzeichen droht letztlich der Totalausfall der Gelenkwelle.

Die Dimensionierung bzw. der Bauteilfestigkeitsnachweis des Maschinenelements „Längenausgleich“ als mit Schiebeseit versehene Zahnwellen-Verbindung ist durch bestehende Berechnungsansätze /1/ abgedeckt. Dabei bleiben die o. a. Verschleißvorgänge im Längenausgleich bisher allerdings unberücksichtigt.

Hier greift das Vorhaben 505 „Gelenkwellen-Längenausgleich“ der FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik) an: Es zielt darauf ab, eine Richtlinie für die Verschleiß optimierte Auslegung des verzahnten Längenausgleichs von Gelenkwellen entwickeln.

Die Basis dafür bilden experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung des Verschleißverhaltens im Längenausgleich. Parallel finden numerische Untersuchungen statt, deren Ergebnisse und Parameter sich mit den bei den Experimenten ermittelten Verschleißkennwerten verifizieren und kalibrieren lassen. Durch die Nutzung der so abgesicherten numerischen Verfahren wird dann die Extrapolation auf andere, nicht experimentell betrachtete Baugrößen möglich. Die numerisch ermittelten Ergebnisse bilden dann die Eingangsgrößen für Verschleißberechnungen, die letztlich Aussagen über den Verschleiß und das daraus resultierende Betriebsverhalten ermöglichen.

2 Experimentelle Untersuchungen

Gegenstand der experimentellen Untersuchungen sind gekürzte Ausführungen von Gelenkwellen zweier unterschiedlicher Baugrößen, die aus dem Nutzfahrzeug- bzw. dem Schienenfahrzeugbereich stammen. Ihre Längenausgleiche weisen Evolventenverzahnungen nach DIN 5480 /2/ mit Bezugsdurchmessern von $d_b = 32$ mm bzw. $d_b = 90$ mm auf.

Die Versuchsbedingungen sind gegenüber den typischen Einsatzbedingungen von Gelenkwellen mit Längenausgleich verschärft, um innerhalb einer vertretbaren Versuchsdauer (Gesamtumdrehungszahl $5 \cdot 10^6$) einen signifikanten Verschleiß herbeizuführen. D. h. bei den Untersuchungen liegt, während die Wellen rotieren, im Regelfall permanent Drehmoment in Höhe von 70% des Nennmoments an. Dies gilt auch für die Versuche mit definierter Verschiebung im Längenausgleich.

Für die Umsetzung dieser Bedingungen kommen zwei Verspannprüfstände zum Einsatz, die an die jeweilige Baugröße angepasst sind und umlaufende Leistungen von 52 kW bzw. 565 kW aufweisen. Das Verspannmoment wird dabei hydraulisch bzw. mechanisch aufgebracht.

Die wichtigsten in den Versuchen variierten Parameter sind:

- die Überdeckungslänge b (bei konstanten d_b): Stufung $b/d_b = 0,8 \leftrightarrow 1,5 \leftrightarrow 3,0$
- die Reibpaarung (Welle/Nabe): Stahl/Rilsan \leftrightarrow Stahl/Stahl
- die Verschiebelänge: groß (5 mm) \leftrightarrow klein (1 mm) \leftrightarrow keine; Verschiebung bei Frequenzen von 1 Hz bzw. 0,5 Hz
- eine zusätzliche Querkraftbelastung: dynamisch (aus Betriebslastmessung) \leftrightarrow statisch (so hoch, dass Selbstzentrierung durch das Verspannmoment aufgehoben) \leftrightarrow keine
- der Größeneinfluss: „kleine“ \leftrightarrow „große“ Baugröße

Zur Erläuterung: Bei der erstgenannten Reibpaarung Stahl/Rilsan ist die Nabenverzahnung mit einer wenige Zehntel Millimeter dicken

Schicht aus Rilsan überzogen. Dies ist ein Handelsname von Polyamid PA 11 – einem thermoplastischen Kunststoff mit hoher Abriebfestigkeit und guten Gleiteigenschaften. **Bild 1** vermittelt einen Eindruck anhand eines FEM-Modells.

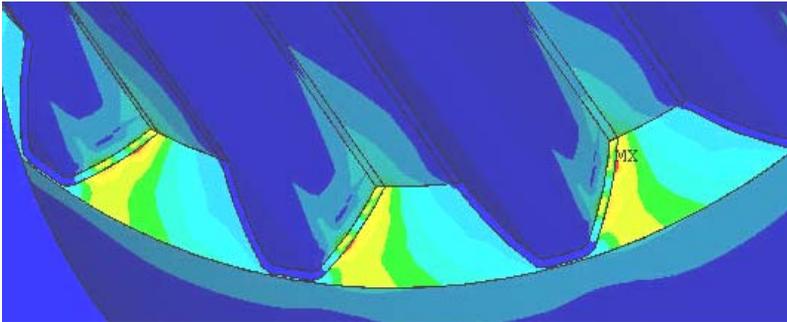


Bild 1: Rilsanschicht in FEM-Modell der „kleinen“ Gelenkwelle ($m = 2 \text{ mm}$, Schichtdicke $0,2 \text{ mm}$); gefräste Wellengeometrie nach /2/

Zur Quantifizierung des Verschleißes im Längenausgleich werden zu Beginn und nach jeweils weiteren $1 \cdot 10^6$ Umdrehungen der Gelenkwellen:

- das Knickspiel in [mm] (in 15° -Schritten) und
- das Verdrehspiel, umgerechnet auf den Teilkreis, in [μm] gemessen.

Die folgenden **Bilder 2 und 3** zeigen beispielhaft die Entwicklung der beiden Verschleißkennwerte an ausgewählten Versuchswellen.

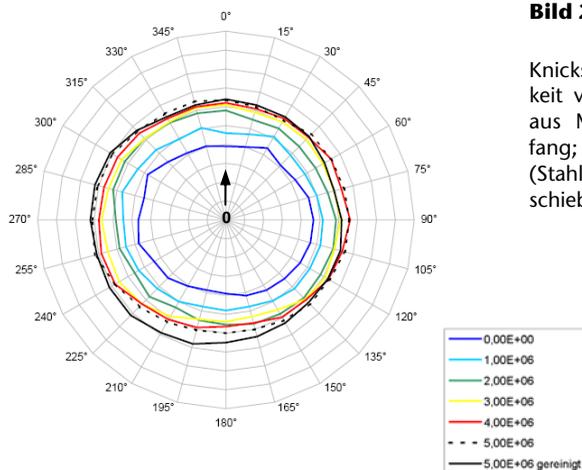


Bild 2:

Knickspiel in [mm] in Abhängigkeit von der Umdrehungszahl aus Messungen über den Umfang; hier: „kleine“ Gelenkwelle (Stahl/Rilsan, $b = 0,8 \cdot d_b$, Verschiebung: 1 mm bei 1 Hz)

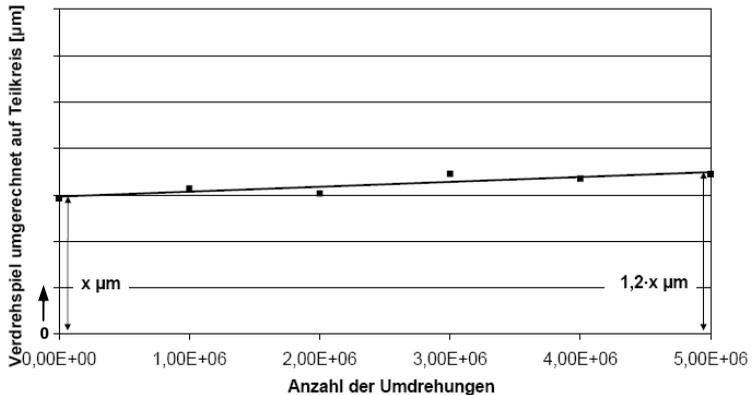


Bild 3: Verdrehspeil in [µm] im Längenausgleich einer „kleinen“ Gelenkwelle (Stahl/Rilsan, $b = 1,5 \cdot d_b$, Verschiebung: 5 mm bei 0,5 Hz)

Für Kennwert-Vergleiche einzelner Versuchsläufe miteinander sind die vorstehend wiedergegebenen Diagramme allerdings nicht optimal. Daher wird hierfür eine geänderte Darstellungsweise gewählt (**Bild 4**).

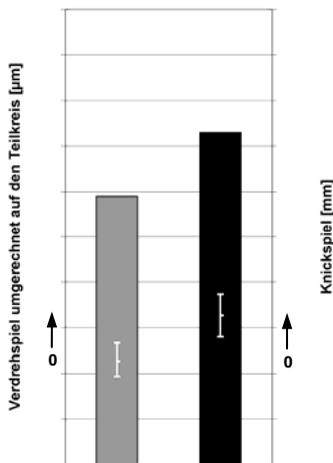


Bild 4:

Darstellungsform der Verschleißkennwerte in einem Diagramm: Säulenfarbe kennzeichnet Anfangs- (grau) und Endwerte (schwarz), Säulenhöhe steht für Verdrehspielwert; eingeschriebene Linien zeigen Kleinst-, Durchschnitts- und Größtwerte des Knickspiels

Im dargestellten Diagramm werden die Ausgangs- und Endwerte der Spiele bei Versuchsbeginn und -ende einander gegenübergestellt – die Zuordnung geschieht über die Säulenfarbe (grau → Startwerte, schwarz → Endwerte). Die Höhe der Säulen veranschaulicht den jeweiligen Verdrehspielwert (Größenachse links), die Spannweite der Knickspielwerte wird durch die Länge der eingeschriebenen senkrechten weißen Linie

vermittelt, ihre waagerechten Teilstriche beziffern das Kleinst-, Durchschnichts- und Größtwert des Knickspiels (Größenachse rechts).

2.1 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Im Folgenden werden aus der Gesamtheit der vorliegenden Untersuchungsergebnisse die Ergebnisse einzelner Gelenkwellen herausgegriffen und verglichen, um die Auswirkung einzelner Parametervariationen zu diskutieren.

Beim Vergleich der verschiedenen Überdeckungsängen an Gelenkwellen mit der Reibpaarung Stahl/Rilsan im Längenausgleich, die bei einer Verschiebung von 1 mm mit einer Verschiebefrequenz von 1 Hz gefahren wurden, ergibt sich **Bild 5**.

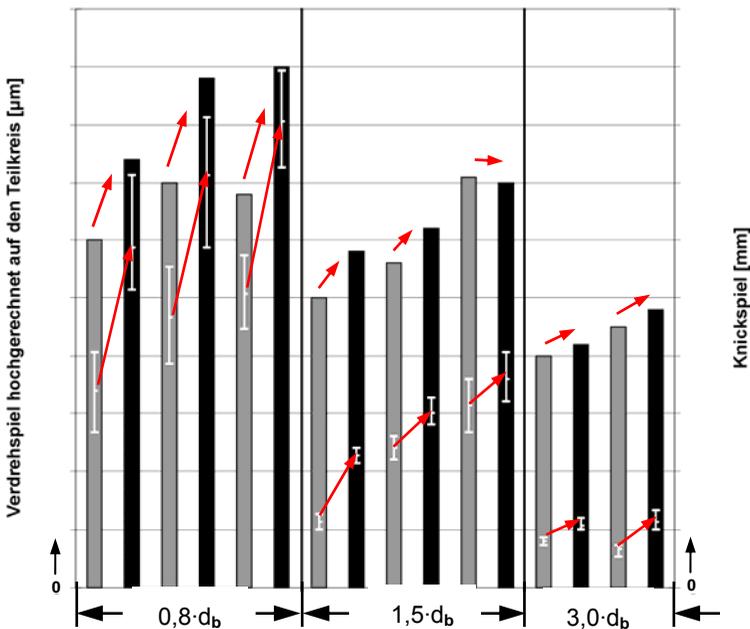


Bild 5: Verschleißkennwerte aus Versuchen mit den drei verschiedenen Überdeckungsängen ($b = 0,8 \cdot d_b$, $1,5 \cdot d_b$ bzw. $3,0 \cdot d_b$), Paarung Stahl/Rilsan, Verschiebelänge und -frequenz jeweils 1 mm bei 1 Hz)

Hier ist die Abhängigkeit der Verschleißkennwerte von der Überdeckungsänge erkennbar: bereits die Anfangswerte beider Kennwerte liegen tendenziell bei den Gelenkwellen mit der kürzesten Überdeckungsänge auf dem höchsten Niveau und bei der längsten Überde-

kungslänge auf dem niedrigsten. Diese Verhältnismäßigkeit setzt sich im Zuge der Versuchs fort: Verdrehspiele und Knickspiele zeigen umso größer werdende Zunahmen je kürzer die Überdeckungslänge ist.

Zieht man die Ergebnisse aus den Untersuchungen bei den verschiedenen Verschiebelängen, nämlich 1 mm und 5 mm heran (**Bild 6**), ist zu erkennen, dass sich die Änderung der Verdrehspiele uneinheitlich darstellt. Die Knickspiele dahingegen steigen bei beiden Verschiebelängen im Schnitt gleich stark an – ein linearer Einfluss ist offensichtlich nicht gegeben.

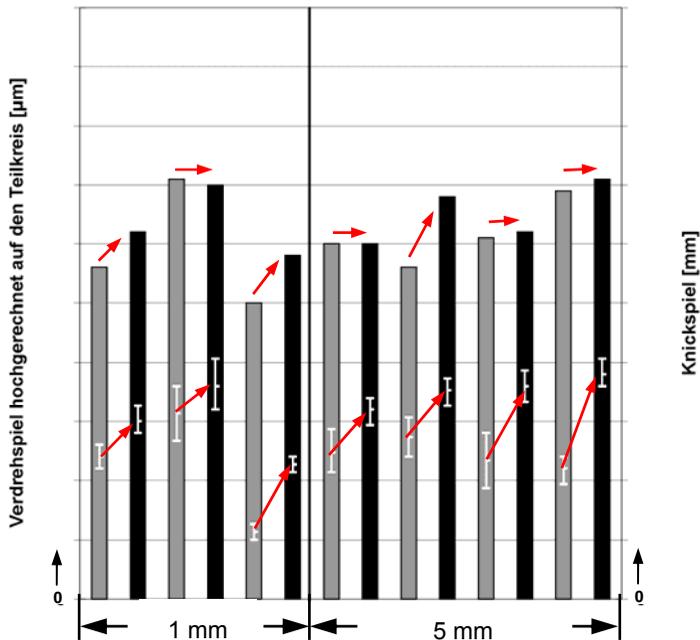


Bild 6: Verschleißkennwerte aus den Versuchen mit den beiden verschiedenen Verschiebelängen (1 mm und 5 mm), Paarung Stahl/Rilsan, $b = 1,5 \cdot d_b$, Verschiebefrequenz jeweils mit 1 Hz

Fokussiert man auf die beiden betrachteten Verschiebefrequenzen, erhält man das in **Bild 7** dargestellte Diagramm. Hier ist anzumerken, dass die Laufzeit bei allen Versuchen konstant gehalten wurde – die Anzahl der Verschiebungen bei 0,5 Hz war somit nur halb so groß wie bei 1 Hz!

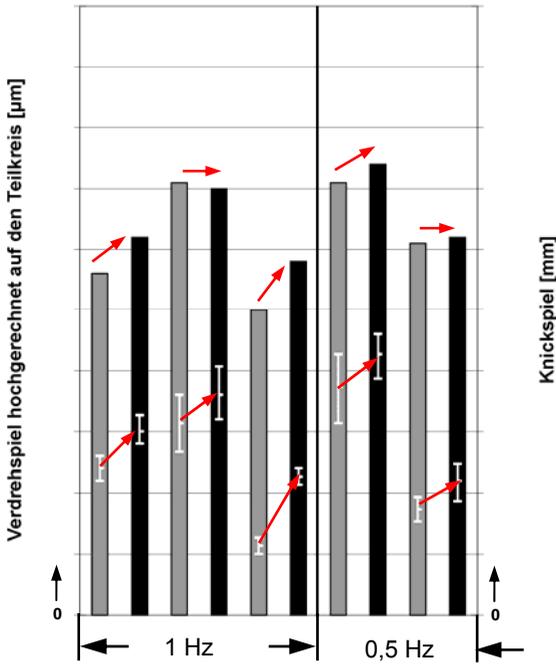


Bild 7:

Verschleißkennwerte aus den Versuchen mit den beiden verschiedenen Verschiebefrequenzen (0,5 Hz und 1 Hz), Paarung Stahl/Rilsan, $b = 1,5 \cdot d_b$, Verschiebelänge jeweils 1 mm

So aufgeschlüsselt ist bei den Gelenkwellen mit doppelt so großer Verschiebungsanzahl (1 Hz) im Schnitt ein deutlicher Anstieg der Verdrehspielwerte zu verzeichnen. Bei den Knickspielwerten ergibt sich das gleiche Bild: auch hier ist die durchschnittliche Zunahme bei doppelt so häufiger Verschiebung größer.

Neben den o. a. Untersuchungen an Gelenkwellen mit der Reibpaarung Stahl/Rilsan im Längenausgleich wurden auch Versuche an solchen mit der Reibpaarung Stahl/Stahl durchgeführt. Im Vergleich ergaben sich hier während der Verschiebung deutlich höhere Axialkraftwerte in den Gelenkwellen. In einzelnen Versuchsabschnitten konnten Verschmutzung, Kopfklemmen oder die bei den Versuchsteilen der „kleinen“ Baugröße vorliegende einseitige Abweichung von der Flankenform als potentielle Ursachen ausgeschlossen werden.

Parallel konnte durch nachträgliche Änderungen an der Verzahnungsgeometrie eine merkliche Verbesserung hinsichtlich des Anstiegs der Axialkräfte im Betrieb erreicht werden. Nichtsdestotrotz war die durch die vergleichsweise große Reibarbeit induzierte Wärmeentwicklung immer noch so groß, dass innerhalb von kurzer Zeit kritische Temperaturen an der Nabenaußenseite der Längenausgleiche auftraten. **Bild 8** vermittelt einen Eindruck vom Verhältnis der auftretenden Axialkräfte bei den beiden Reibpaarungsvarianten und veran-

schaulicht zudem den Temperaturanstieg auf der Außenseite des Längenausgleichs von Gelenkwellen mit der Stahl/Stahl-Reibpaarung.

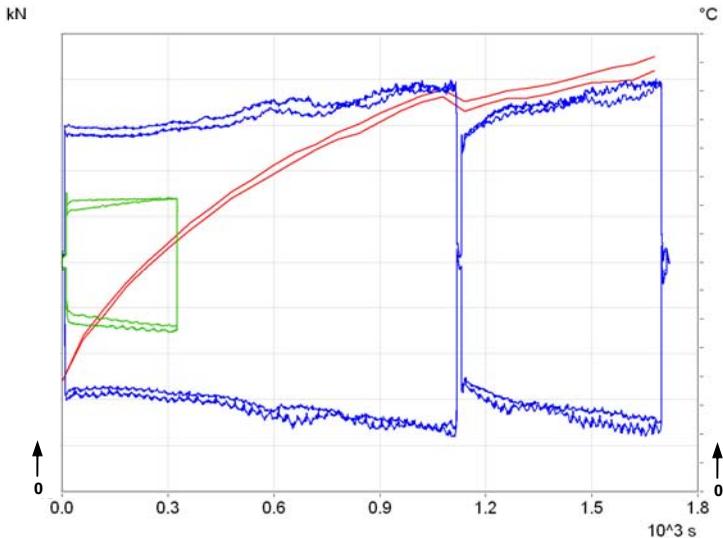


Bild 8: Hüllkurven der Gelenkwellen-Axialkräfte mit den verschiedenen Reibpaarungen Stahl/Stahl (blau) und Stahl/Rilsan (grün) im Längenausgleich; Temperaturverlauf Längenausgleich (rot), $b = 1,5 \cdot d_b$, Verschiebelänge und –frequenz: jeweils 5 mm bei 1 Hz

Da in den Versuchen eine Temperaturgrenze zu beachten war, wurde aufgrund der dargestellten Temperaturentwicklung beschlossen die bisher über die gesamte Versuchslaufdauer bestehende Verspannung bei Wellen mit Stahl/Stahl-Paarung im Längenausgleich in definierten zeitlichen Abständen zu lösen und auf diese Weise die vorgesehene Grenztemperatur einzuhalten. Mit dieser Fahrweise werden die Untersuchungen nun fortgeführt.

3 Numerische Untersuchungen

Im Zuge der eingangs erwähnten numerischen Untersuchungen besteht ein Teilziel in der genauen Abbildung der in den experimentellen Untersuchungen verwandten Versuchsteile. Dies umfasst dabei sowohl die mittels Kaltumformung erzeugte Geometrie der Wellenverzahnung als auch die Berücksichtigung der optionalen Rilsanschicht auf der Nabenzahnung.

Ausgehend vom in **Bild 1** dargestellten Modell, das noch die Wellenverzahnung mit kleinem Fußrundungsradius aufweist, sind inzwi-

schen Rechnungen abgeschlossen worden, in denen die volle Fußausrundung in den Längenausgleichen umgesetzt wurde. (**Bild 9**).

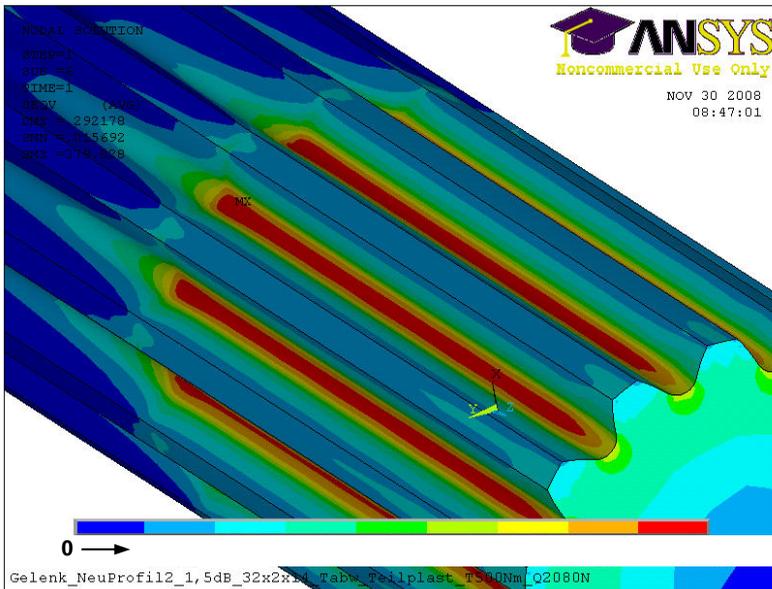


Bild 9: Ergebnis einer FEM-Berechnung auf Basis einer Zahnwelle mit voller Fußausrundung; Reibpaarung Längenausgleich: Stahl/Stahl, $b = 1,5 \cdot d_b$, Berechnung mit Spiel und Teilungsabweichungen, Lasten: $T = 500 \text{ Nm}$ und $F_Q = 2080 \text{ N}$

Bereits im Ergebnis vorher angestellter Rechnungen mit bzw. ohne Rilsanschicht zeigte sich, dass die Schicht neben ihrer Fähigkeit die Axialkräfte bei Verschiebung unter Last herabzusetzen (**Bild 8**) weitere positive Auswirkungen hat. Zwei davon verdeutlicht **Bild 10**, wo die Kontaktdrücke über der gemeinsamen Verzahnungsbreite an einer ausgewählten Zahnflanke dargestellt sind: die Schicht verringert die Druckmaxima an den Enden der Verzahnung (zw. etwa 20% bei $b = 0,8 \cdot d_b$ und 30% bei $b = 3,0 \cdot d_b$) und ein größerer Bereich der Zahnflanke wird in die Drehmomentübertragung miteinbezogen. Außerdem wird der Einfluss von Spiel und Teilungsfehlern minimiert: treten hierbei ohne Rilsanschicht noch Steigerungen im Bereich von 10% bis 15% auf, sinken diese mit Rilsanschicht auf unter 5%. Daneben sorgt die Schicht dafür, dass die berechneten maximalen Vergleichsspannungswerte in der Nabe deutlich, d. h. bis zu 40% sinken.

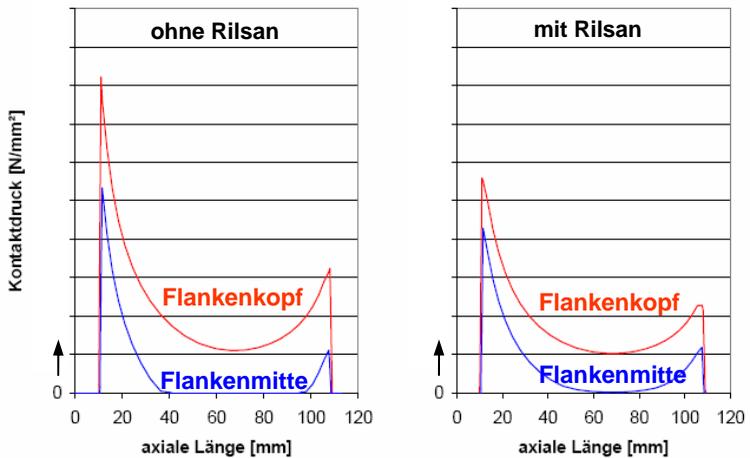


Bild 10: Ergebnis einer FEM-Berechnung an einer Zahnwelle der „kleinen“ Baugröße; Überdeckungslänge $3,0 \cdot d_b$, Berechnung mit Spiel und Teilungsabweichungen, Last: $T = 500 \text{ Nm}$

Neben den Auswirkungen der Rilsanschicht zeigt sich in den Berechnungsergebnissen auch ein Einfluss der Überdeckungslänge im Längenausgleich: mit zunehmender Länge sank auch hier der Wert der maximalen Vergleichsspannung in der Nabe um bis zu 10% (Paarung Stahl/Stahl) bzw. bis zu 15% (Paarung Stahl/Rilsan). Die Vergleichsspannungswerte in der Welle sanken, wie auch bei Berücksichtigung der Rilsanschicht, gleichzeitig nur marginal.

4 Literatur

- /1/ DIN 5466E: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen. Beuth, Berlin, 2002
- /2/ DIN 5480: Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser. Beuth, Berlin, 2006