

## Einfluss der Schmierung auf die Gestaltfestigkeit der Passverzahnung

Springorum, J.F.; Schäfer, G.

*Die Dimensionierung von Passverzahnungen muss verschiedene Aspekte berücksichtigen. Dazu gehören neben der Gestaltfestigkeit auch die Verschleißfestigkeit und die dazwischen agierende Reibdauerschädigung. Mit diesem Betrag wird für die Wahl eines geeigneten Festigkeitsnachweises Licht in den Bereich zwischen Gestaltfestigkeit und Reibdauerschädigung gebracht und der Einfluss der Reibbeanspruchung im Kontakt auf die Beanspruchung in der Zahnfußausrundung geklärt.*



*The dimensioning of splined shaft-hub connections takes account of fatigue strength and wear plus the blended fretting load. Within this paper a detailed view is given on friction and their impact on fatigue strength in the foot root.*

*Keywords: Involute splines, fracture, fretting, fatigue, lubrication, notch effect, fillet root*

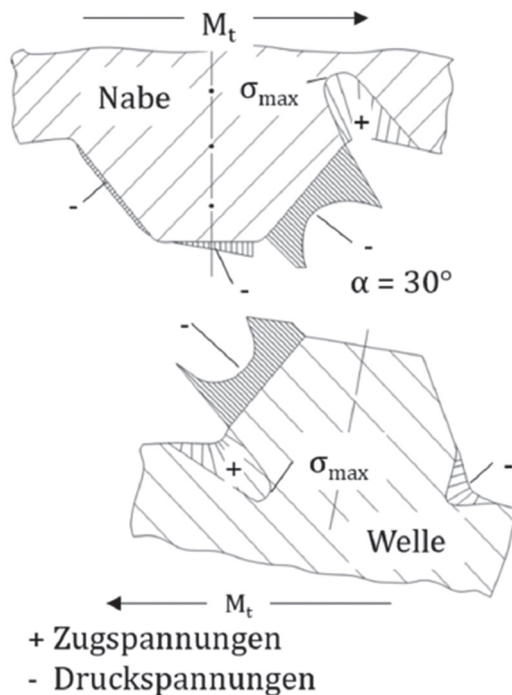
### Einleitung

Die wachsenden Anforderungen an die Antriebskomponenten von Automobilen im motorischen und generatorischen Betrieb erfordern die Auswahl geeigneter Fertigungs- und Werkstoffkonzepte zur Steigerung der Leistungsdichte und Ressourceneffizienz.

Für die Übertragung des Drehmoments zu den Antriebsrädern kommen Leichtbauwellen (Hohlwellen) zum Einsatz. Die Drehmomentein- und -ausleitung erfolgt dabei über Passverzahnungen/Zahnwellenverbindungen. Diese Elemente sind im Betrieb statischen sowie zyklischen Torsionsbelastungen ausgesetzt. Die Festigkeitseigenschaften der Passverzahnungen, d. h. der Widerstand gegen statische Überlastbrüche sowie die ertragbare Beanspruchung bei zyklischer Belastung, sind neben der Geometrie von den eingestellten Werkstoffeigenschaften abhängig. Bislang ist jedoch unklar, wie sich beispielsweise eine, für den Verschleißschutz empfehlenswerte Ölschmierung und der dadurch modifizierte Reibungszustand im Flankenkontakt auf die statischen und die zyklischen Festigkeitseigenschaften der Passverzahnungen auswirkt.

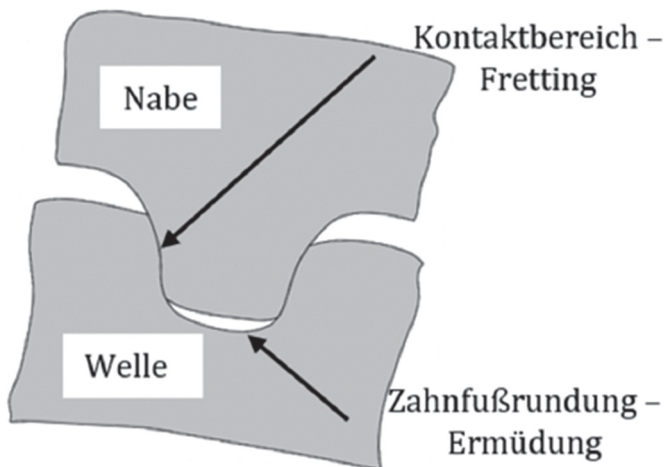
## Stand der Technik

Die Leichtbauwellen sind im Betrieb einerseits hohen statischen Belastungen ausgesetzt, z. B. durch Misuse-Fälle (Knallstart etc.), und müssen zudem die Funktionsfähigkeit über die geforderte Fahrzeuglebensdauer gewährleisten. Abbildung 1 stellt den Spannungsverlauf der Welle und der Nabe im simulierten Kontakt dar. Es wird deutlich, dass die dem Torsionsmoment entgegen gerichtete Flankenseite der Welle im Zahnfuß große Zugspannungen erfährt. Auf der gegenüberliegenden Flankenseite wirken Druckspannungen. Die Höhe und Verteilung der Spannungen ist von der jeweiligen Verzahnungsgeometrie abhängig. Werden die Passverzahnungen über ihre statische Belastungsgrenze hinaus tordiert, d. h. über die örtlich maximal ertragbare Beanspruchbarkeit des Werkstoffes, kommt es zum Gewaltbruch, der sich je nach Werkstoffverhalten duktil oder spröde ausprägen kann. Der Ort und die Ausprägung des Bruches, an dem die zulässige Beanspruchung überschritten wird, hängen von den über der Bauteildicke ausgeprägten Werkstoffeigenschaften ab. Die Überlastbrüche gehen meist von der Zahnfußausrundung im Bereich des Übergangs zwischen Welle und Nabe und einem einhergehenden Steifigkeitssprung oder dem Verzahnungsauslauf aus /1, 2/.



**Abbildung 1:** Spannungsverteilung über der Wellen- und Nabenkontur (nach /3/)

Bei zyklischer Belastung treten in der formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung Mikrobewegungen zwischen den Zahnflanken der Verbindungspartner auf. Diesen Vorgang bezeichnet man auch als Schwingungsverschleiß oder Reibdauererschleiß. Die geometriebedingten Kerben und der festigkeitsmindernde Einfluss des Schwingungserschleißes können bei zyklischer Beanspruchung zum Reibdauerbruch (Fretting Fatigue) oder zum spannungsmechanisch hervorgerufenen Ermüdungsbruch führen. Bei flankenzentrierten Passverzahnungen befindet sich der spannungsmechanisch höchst beanspruchte Ort in der Zahnfußausrundung oder im Verzahnungsauslauf. Neben der spannungsmechanisch hervorgerufenen Werkstoffermüdung dieser kritisch beanspruchten Kerbbereiche besteht potenziell die Möglichkeit, dass durch die Reibdauerbeanspruchung im Kontaktbereich der Verbindungspartner ein Reibdauerermüdungsschaden auftritt. Die unterschiedlichen Bruchorte dieser beiden Phänomene sind in Abbildung 2 dargestellt /4/.



**Abbildung 2:** Zahnwellenverbindung mit potenziellen Bruchorten (nach /4/)

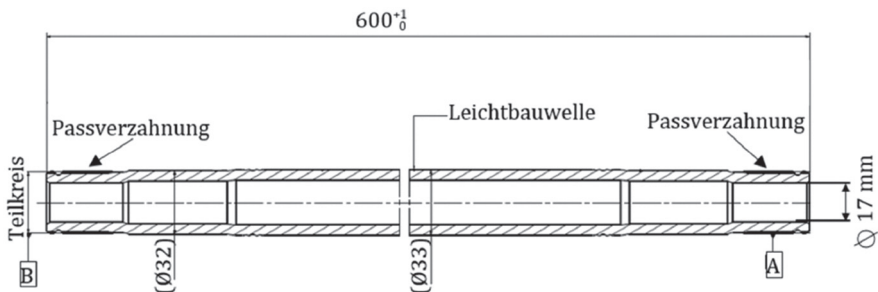
Beobachtungen zum Einfluss der Reibdauerbeanspruchung auf die Ermüdungseigenschaften von Passverzahnungen macht Chan in /5/. Die Rissausgänge befinden sich auf den Flanken der Verzahnung und der eigentliche Bruchort des Haupttrisses befindet sich am Ende der Passverzahnung im Bereich der Zahnfußausrundung. Chan beschreibt, dass sich auf den Zahnflanken eine raue Oberfläche bildet, die mit den typischen rotbraunen Materialabträgen benetzt war, welche charakteristisch für das Versagen von reibdauerbeanspruchten Stahlteilen sind. Aus den analysierten Phänomenen schloss Chan, dass ein Reibdauerermüdungsversagen vorliegt.

## Fragestellung und Vorgehensweise

Hinsichtlich der überlagerten Reibdauerbeanspruchung lassen sich für torsionsbelastete Passverzahnungen u. a. die folgenden Wissenslücken identifizieren:

- Eindeutige Identifizierung der Bruchausgänge in Abhängigkeit von Bruchmechanismen (spannungsmechanische Ermüdung im Bereich freier Oberflächen vs. Reibdauerermüdung in den Kontaktbereichen)
- Einfluss der Reibungsreduktion, z. B. durch eine Ölschmierung, auf die zyklische Festigkeit von axial nicht verschiebbaren Passverzahnungen bei Torsionsbeanspruchung

Diese beiden Fragestellungen wurden neben umfangreichen werkstofflichen Fragestellungen im Rahmen einer Dissertation /6/ am Lehrstuhl für Werkstoffsysteme für den Fahrzeugleichtbau an der Universität Siegen unter der Leitung von Professor Robert Brandt in Kooperation mit dem IMW der TU Clausthal bearbeitet. Die Untersuchungen in /6/ wurden an Hohlwellen durchgeführt, die in Abbildung 3 dargestellt sind.

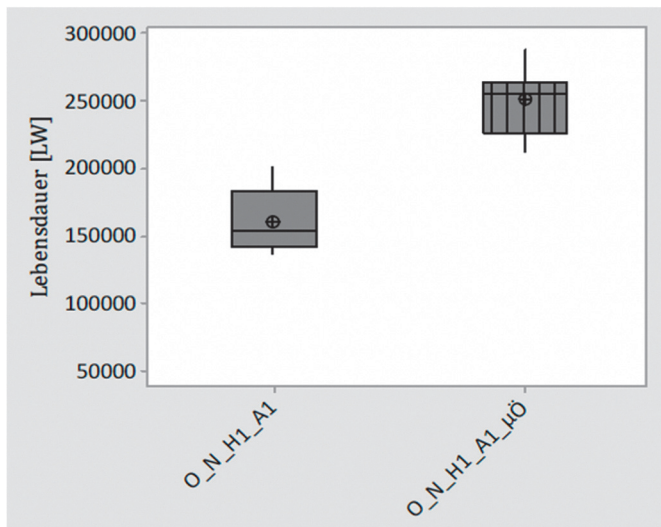


**Abbildung 3:** Prüfwellen mit Verzahnung ähnlich DIN5480-29x1x28,  $\rho_f = 0,48 \times m$

Die ausgewählte Hinterachswelle aus 34MnB5 eignet sich besonders für die Untersuchungen, da sowohl bei statischer wie auch bei zyklischer Belastung die Passverzahnung den höchstbeanspruchten Bereich und damit die Schwachstelle der Leichtbauwelle darstellt. Die Verzahnung wurde dabei mit den nach /7/ günstigen Geometrieparametern einer Zahnzahl von circa  $z = 30$  und einem Fußrundungsradius von  $\rho_f = 0,48 \times m$  gefertigt.

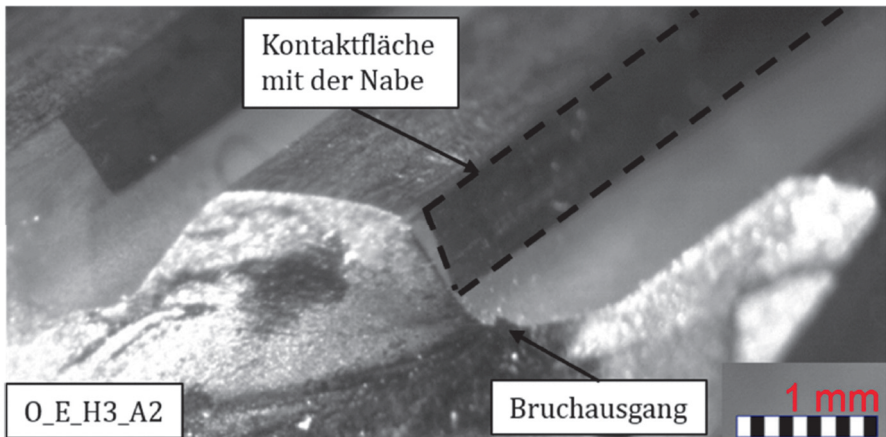
## Experimentelle Ergebnisse

In Abbildung 4 sind die zyklischen Festigkeiten von Wellen mit identischer Wärmebehandlung (Ofenhärtung in Neutraler Atmosphäre mit 0,34% C und einer Haltezeit **H1**, anschließend 2h angelassen bei einer Temperatur **A1**) dargestellt. Der Unterschied zwischen den beiden Versuchsreihen ist lediglich die zyklische Torsionsbelastung mit oder ohne Ölbadtauchschmierung. Allein durch die Ölschmierung ( $\mu\ddot{O}$ ) kann die zyklische Festigkeit um rund 56 % gesteigert werden /6/. Der positive Einfluss der Ölschmierung auf das Verschleißverhalten sei hier nur am Rande erwähnt.



**Abbildung 4:** Zyklische Lebensdauer ( $M_t = 1300 \text{ Nm}$ ,  $R = -1$ ) der Leichtbauwellen der Versuchsreihe O\_N\_H1\_A1 ohne, sowie der Reihe O\_N\_H1\_A1\_μÖ mit Ölschmierung)

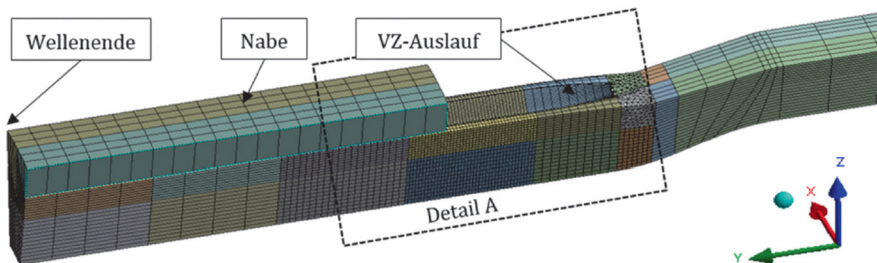
Die Position des Bruchausgangs lag für die ungeschmiente und die ölgeschmiente Variante aus Abbildung 4 jeweils in der Zahnfußausrundung. Dies ist in Abbildung 5 anhand einer weiteren ungeschmienten Variante (E = einsetzgehärtet, H3>H1, A2>A1) nochmals im Detail dargestellt. Hier ist gut zu erkennen, dass der Bruchausgang kurz unterhalb des Kontaktbereiches in der Zahnfußausrundung liegt. Die räumliche Trennung der Reibdauerbeanspruchung auf der Flanke und der spannungsmechanische Ermüdungsschaden in der Zahnfußausrundung werden deutlich. Zeichen, die auf eine Korrosionsermüdung hinweisen sind nicht zu erkennen.



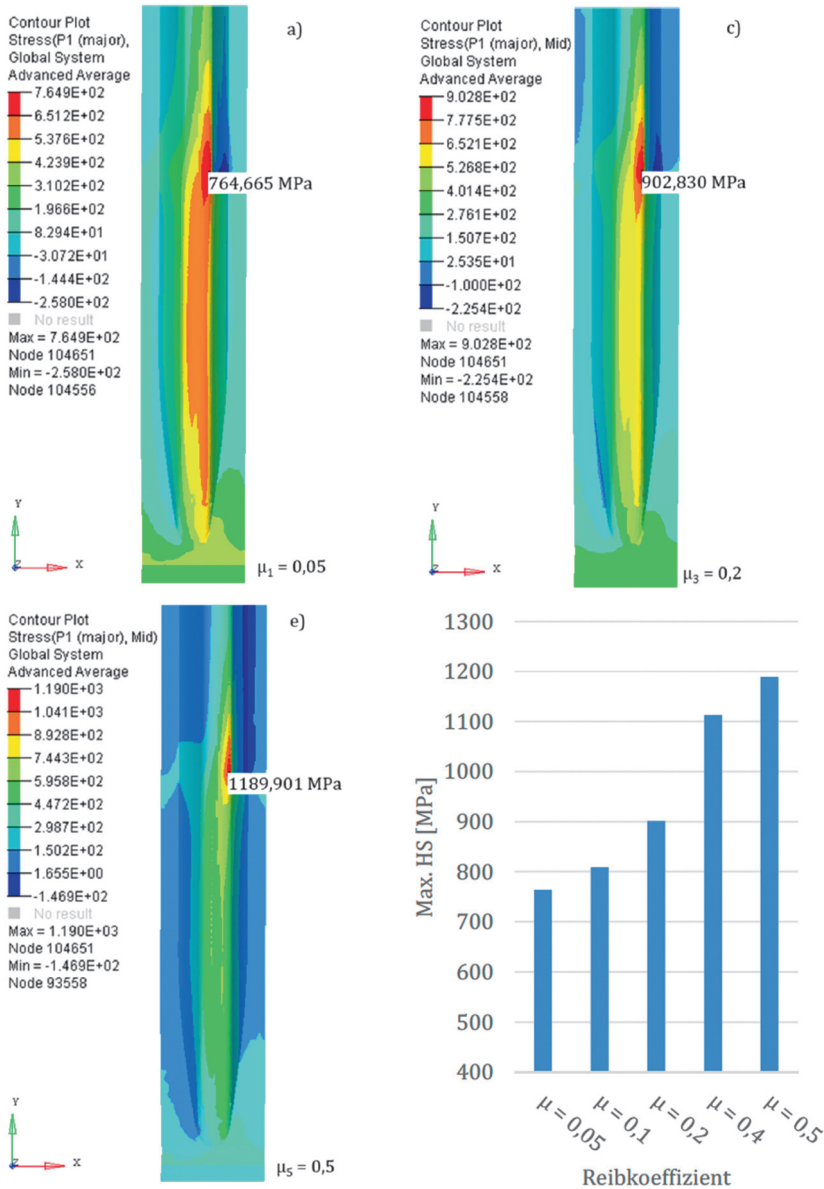
**Abbildung 5:** Bruchbild einer Welle der Versuchsreihe O\_E\_H3\_A2

### Numerische Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass eine Ölschmierung die zyklische Festigkeit der Passverzahnung erhöht, obwohl die Bruchausgänge im kontaktfreien Bereich liegen. Die FE-Untersuchungen zum Einfluss der Reibung auf die Zahnfußtragfähigkeit dienen somit der Überprüfung, inwiefern eine Veränderung der Reibungsbedingungen in der Verbindung zu einer Veränderung der Beanspruchungsausprägung im Fuß der Passverzahnung und damit zur Steigerung der zyklischen Festigkeit führt. Dazu wird ein Teilmodell eines Zahns mit zyklischer Symmetrie und Krafteinleitung über die Nabenumfangsfläche aufgebaut, Abbildung 6.



**Abbildung 6:** Modellaufbau der aufgebauten Passverzahnung



**Abbildung 7:** Maximale Hauptspannungen bei einem Torsionsmoment von  $M_t = 1300 \text{ Nm}$ , ( $R=-1$ ) in Abhängigkeit vom Reibkoeffizienten  $\mu$  (a:  $\mu_1 = 0,05$ ; b:  $\mu_2 = 0,1$ ; c:  $\mu_3 = 0,2$ ; d:  $\mu_4 = 0,4$ ; e:  $\mu_5 = 0,5$ )

Für die Berechnungen werden die Reibkoeffizienten  $\mu_1 = 0,05$ ,  $\mu_2 = 0,1$ ,  $\mu_3 = 0,2$ ,  $\mu_4 = 0,4$  und  $\mu_5 = 0,5$  angewendet. In Abbildung 7 sind die Verteilungen der maximalen Hauptspannungen in Abhängigkeit von den Reibkoeffizienten bei einem Drehmoment von  $M_t = 1300 \text{ Nm}$  dargestellt. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass mit steigendem Reibkoeffizienten  $\mu$  zwischen den Kontaktpartnern die maximalen Hauptspannungen im Zahnfuß steigen. So kommt es durch die Erhöhung von  $\mu_1 = 0,05$  auf  $\mu_5 = 0,5$  zu einer Steigerung der maximalen Hauptspannungen von  $\sigma_1 = 764,665 \text{ MPa}$ , auf  $\sigma_1 = 1189,901 \text{ MPa}$ , und damit um rund 56 %. Die Lebensdauer-steigerung zwischen der Variante O\_N\_H1\_A1 und der mit Öl geschmierten Variante O\_N\_H1\_A1\_μÖ kann damit auf eine Reduktion der maximalen Hauptspannungen aufgrund der Reibungsreduktion zwischen den Flanken zurückgeführt werden /6/.

## Zusammenfassung

Bei den zyklischen Schwingversuchen konnten ausschließlich Ermüdungsrisse im kontaktfreien Bereich detektiert werden. Reibdauerermüdungsschäden können somit ausgeschlossen werden. Zudem wird durch die Variation des Reibkoeffizienten im Kontaktbereich nachgewiesen, dass sich die Reibung im Kontaktbereich proportional auf die Spannungen in der kontaktfreien Zahnfußausrundung auswirkt.

## Literatur

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen, Büttelborn, 1978
- /2/ Daryusi, A., Lau, P., Schlecht, B., Lohrengel, A.: Ermittlung der Kerbwirkung bei Profilwellen für die praktische Getriebeberechnung von Zahnwellen. Forschungsvorhaben Nr. 467 I. Abschlussbericht, Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA), AiF-Forschungsberichte, Teil 905, 2009
- /3/ Schöpf, H.-J.: Festigkeitsuntersuchung an Zahnwellen-Verbindungen mit Spannungsoptik und Dauerschwingversuchen. Dissertation, München, 1976
- /4/ Vidner, J.: Methode zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von reibdauerbeanspruchten Systemen, Springer Vieweg, Stuttgart, 2016
- /5/ Chan, P., Thornley, J.: Common features of fretting-fatigue cracking in steels. Practical Failure Analysis 2 2002, 2002, 85–90
- /6/ Springorum, J. F.: Werkstoffmechanische Einflussfaktoren auf die Zahnfußtragfähigkeit von Passverzahnungen auf Hohlwellen, Dissertation, Universität Siegen, 2019, ISSN 2700-7529
- /7/ Schäfer, G.: Zahnwelle 3.0, Institutsmitteilung Nr. 44, Seite 29 – 32, IMW TU-Clausthal, 2019, ISSN 0947-2274