



OBERFLÄCHENVERBESSERUNG FÜR HÖHERE LEISTUNG VON ZAHNRAD- UND LAGERSYSTEMEN

Da die Nachfrage nach leistungsstärkeren und effizienteren Zahnrädern und Antriebssträngen – insbesondere in Elektrofahrzeugen – weiter zunimmt, sind umfassendere systemische Verbesserungen unter Einsatz fortschrittlicher Fertigungsverfahren erforderlich. Ein Bereich, in dem das Potenzial besteht, die Leistung von Zahnrädern und Antriebssträngen ohne umfangreiche Neukonstruktionen zu verbessern, sind die Oberflächeneigenschaften von Zahnrädern (und Lagern).

Bei vielen Getrieben teilen sich Zahnräder und Lager ein gemeinsames Schmiersystem. Abgesehen von Anwendungen mit Fettschmierung verwenden diese Schmiersysteme typischerweise ein einfaches Ölbad-/Sprühverfahren oder, für anspruchsvollere Anwendungen, eine Druck-/Sprühschmierung. Bei beiden dieser „ölbasierten“ Systeme müssen Getriebekonstrukteure und/oder Endanwender ein einziges Schmiermittel sowohl für die Zahnräder als auch für die Lager auswählen. Diese Entscheidung kann zu Kompromissen bei der Gesamtleistung des Systems und der Leistung/Lebensdauer einzelner Komponenten führen.

Öl oder synthetische Schmierstoffe erfüllen in einem Getriebe viele Funktionen, darunter die Ableitung von Wärme, der Schutz vor Korrosion, die Geräuschreduzierung und ein gewisser Schutz vor Stoßbelastungen. Es ist jedoch anzunehmen, dass ihr Hauptzweck darin besteht, Reibung und Verschleiß zu reduzieren, indem sie eine gewisse Filmtrennung zwischen den ineinandergreifenden Zahnrädern und separat zwischen den Lagerkomponenten gewährleisten. Während Schmierstoffe mit höherer Viskosität eine bessere Filmtrennung ermöglichen, verursachen sie auch höhere Reibungs-/Verwirbelungsverluste [1]. Diese

Reibungs-/Verwirbelungsverluste werden bei höheren Betriebsgeschwindigkeiten für Zahnräder und Lager verstärkt[2]. Daher wäre es vorteilhaft, die Viskosität des Schmiermittels zu reduzieren, um die Effizienz des Getriebes zu verbessern. Durch die Reduzierung der Viskosität des Schmiermittels erhöht sich jedoch das potenzielle Risiko einer Misch- oder Grenzschmierung der Zahnräder, es sei denn, die Verbundrauheit kann auf andere Weise verringert werden.

REM hat bereits zuvor das Potenzial isotroper Superfinishing-Verfahren (wie beispielsweise das **ISF®-Verfahren von REM**) erörtert, mit denen die Oberflächenrauheit von bearbeiteten Bauteilen wie Zahnrädern drastisch reduziert und gleichzeitig die Oberflächenstruktur in ein nichtgerichtetes Muster umgewandelt werden kann. Diese Oberflächen erreichen in der Regel Rauheitswerte von $R_a < 0,1 \mu\text{m}/4 \mu\text{in}$ [3] [4] und bieten erhebliche Leistungsvorteile für Zahnräder, darunter Beständigkeit gegen Kontaktermüdung, Mikropitting [5] und Fressen [6]. Zwar können Bearbeitungsverfahren wie Fein- oder Polierschleifen die Oberflächenrauheit ebenfalls verringern, sie führen jedoch im Allgemeinen zu höheren Rauheitswerten ($0,15 \mu\text{m } R_a$ [7] oder größer). Darüber hinaus ist die Textur dieser (und aller) geschliffenen/bearbeiteten Oberflächen grundsätzlich richtungsabhängig (und nicht isotrop), und in fast allen Fällen ist die Richtungsabhängigkeit der verbleibenden Oberflächenstruktur so, dass die verbleibenden Spitzen- (oder möglicherweise Plateau-) und Talmerkmale senkrecht zur Roll- und/oder Gleitbewegung der Zahnräder verlaufen. Diese gerichtete Textur ist zwar im Vergleich zu herkömmlichen Schleifverfahren deutlich verbessert, jedoch unter Berücksichtigung von Kontaktermüdung und Abriebrisiken noch nicht optimal. Zur Verbesserung der Filmtrennung und zur Ermöglichung der Verwendung von Schmiermitteln mit niedrigerer Viskosität können diese fein bearbeiteten Oberflächen jedoch ausreichend sein. Allerdings müssen die Sicherheitsfaktoren für das Zahnradssystem berücksichtigt werden, da R_a -Werte allein möglicherweise keine ausreichende Vorhersage über die Lebensdauer der Zahnräder ermöglichen.

Zurückkommend auf die oben genannte Prämisse: Wenn die Viskosität des Schmiermittels reduziert werden kann, wodurch die Zahnradeffizienz verbessert und gleichzeitig die Flankenrauheit/Verbundrauheit des Zahnrads verringert wird, kann ein Lambda-Verhältnis aufrechterhalten werden, um eine vollständige Filmtrennung zu gewährleisten. Die reduzierte Verbundrauheit hat den zusätzlichen Vorteil, dass sie die Reibung zwischen den zusammenwirkenden Zahnrädern verringert und so die Effizienz der Zahnräder weiter erhöht. Im Jahr 2007 stellte General Motors in einer Studie mit der Ohio State University fest, dass isotrop superfinishbearbeitete Stirnräder im Vergleich zu standardmäßig geschliffenen Zahnrädern sowohl bei groben als auch bei feinen Steigungen eine Effizienzsteigerung von etwa 17 Prozent aufweisen.[8] Diese Schlussfolgerungen sind im Allgemeinen logisch und nachvollziehbar. Über die offensichtlichen Vorteile der Kombination einer isotropen Superfinish-Behandlung (oder eines anderen Verfahrens zur Reduzierung der Rauheit) mit einem Schmiermittel mit niedrigerer Viskosität hinaus lassen sich jedoch zusätzliche Vorteile in Bezug auf das Getriebe oder die Systemlager erzielen. Allerdings gibt es auch potenzielle Probleme und Hindernisse, die überwunden werden müssen.

Bei vielen Getrieben sind die Kontaktgeschwindigkeiten der Zahnräder höher als die Kontaktgeschwindigkeiten der Lager. Dies trifft sicherlich nicht auf alle Lager zu, jedoch ist es eine Tatsache, die berücksichtigt werden muss, wenn Schmierstoffe mit niedrigerer Viskosität in Verbindung mit superfinishbearbeiteten/isotrop superfinishbearbeiteten Zahnrädern zur Steigerung der Effizienz vorgeschlagen werden. Angesichts dieser geringeren Kontaktgeschwindigkeit in den Lagern und der daraus resultierenden geringeren Mitführgeschwindigkeit für das Schmiermittel in Verbindung mit den allgemein höheren Hertzschen Drücken, denen die Lager ausgesetzt sind, besteht ein höheres Risiko für gemischte oder Grenzschmierung in den Lagern. Da Lager im Allgemeinen bereits eine sehr geringe Oberflächenrauheit aufweisen, bietet die Anwendung eines isotropen Superfinish-Verfahrens oder ähnlichem zwar in einigen Fällen noch Vorteile, jedoch nicht das gleiche Potenzial, um diese potenzielle Misch-/Grenzschmierungsdynamik und die damit verbundenen Kontaktermüdungsprobleme zu beheben. Ohne eine alternative Lösung ist das Potenzial zur Steigerung der Getriebeeffizienz durch Verringerung der Zahnradrauheit und der Schmierstoffviskosität daher begrenzt und/oder würde eine komplexere Neukonstruktion des gesamten Getriebes erfordern. Möglicherweise könnte ein separates, zusätzliches Schmiersystem für die Lager vorgeschlagen werden, jedoch würde diese Modifikation aufgrund einer Erhöhung des Getriebegegengewichts mit ziemlicher Sicherheit einige oder alle Vorteile der gesteigerten Zahnradeffizienz zunichte machen.



Glücklicherweise gibt es alternative Lösungen, die eine Überlegung wert sind – Beschichtungen, insbesondere diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtungen (DLC-Beschichtungen). DLC-Beschichtungen werden seit den 1970er Jahren erforscht und werden seit Anfang bis Mitte der 2000er Jahre häufig in Lageranwendungen eingesetzt. DLC-Beschichtungen können bei ausreichender Haftfähigkeit erhebliche Vorteile für Wälz- und Gleitlageranwendungen bieten, bei denen die Schmierbedingungen aufgrund der extrem hohen Härte (weit über 70 HRC) und des extrem niedrigen Reibungskoeffizienten der Beschichtung beeinträchtigt sein können. Somit bieten DLC-Beschichtungen zusätzliche Sicherheitsfaktoren für die Lager, falls Schmierstoffe mit niedrigerer Viskosität verwendet werden und die Schmierfilmdicke zu einem Problem wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zur Steigerung der Effizienz von Getrieben über die aktuellen Standards hinaus möglicherweise umfassendere, systembasierte Optimierungen erforderlich sind. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Zahnrädern und Lagern von Hochgeschwindigkeitsgetrieben erfordern eine sorgfältige Betrachtung. Mögliche Effizienzsteigerungen lassen sich durch einen kombinierten Ansatz erzielen, bei dem die Rauheit der Zahnräder reduziert wird, um die Effizienz zu steigern, und durch die Verwendung eines Schmiermittels mit niedrigerer Viskosität, wodurch die Effizienz durch Verringerung der Reibungsverluste weiter erhöht wird. Allerdings müssen die Auswirkungen auf die Lager berücksichtigt werden, und möglicherweise ist die Verwendung einer DLC-Beschichtung auf diesen Lagern erforderlich, um Kontaktermüdung oder andere Risiken zu vermeiden. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass isotropes Superfinishing und DLC-Beschichtung in der Regel auf bestehende Getriebe- und Lagerkonstruktionen angewendet werden können, da nur sehr wenig Material abgetragen oder hinzugefügt wird. Somit stellen sie eine „einfache“ Option dar, die ohne aufwändigen und kostspieligen Neugestaltungsaufwand umgesetzt werden kann.

Ein herzliches Dankeschön an Michael Berhan, dessen E-Mail-Korrespondenz die Inspiration für diese Kolumne lieferte.

REFERENZEN

1. Bell, M., “Optimizing Performance with Surface Finish and Lubrication.” Gear Solutions, März 2016, S. 20 – 21.
2. Lahtoi, S., et al, “Electric vs. Combustion: A comparative analysis of gear design for commercial vehicle applications.” Gear Solutions, September 2025, S. 36 – 41.
3. Michaud, J., “Isotropic Superfinishing.” Gear Solutions, Oktober 2015, S. 22 – 24.
4. Michaud, J., “Gear Surfaces and Operational Performance.” Gear Solutions, Dezember 2015, S. 18 – 19.
5. McCormick, M., “Micropitting.” Gear Solutions, September 2016, S. 22 – 23.

6. McCormick, M., "Scuffing." Gear Solutions, August 2016, S. 24 – 25.
7. Graf, W., "Polish Grinding of Gears for Higher Transmission Efficiency." Gear Solutions, Mai 2016, S. 33 – 40.
8. Winkelmann, L. et al, "Automotive Fuel Efficiency Standards and the Impact from Gears." Gear Solutions, Juni 2016, S. 20–21.

Wiederveröffentlicht mit freundlicher Genehmigung von: <https://gearsolutions.com/departments/materials-matter/surface-finish-improvement-for-gear-and-bearing-system-gains/>