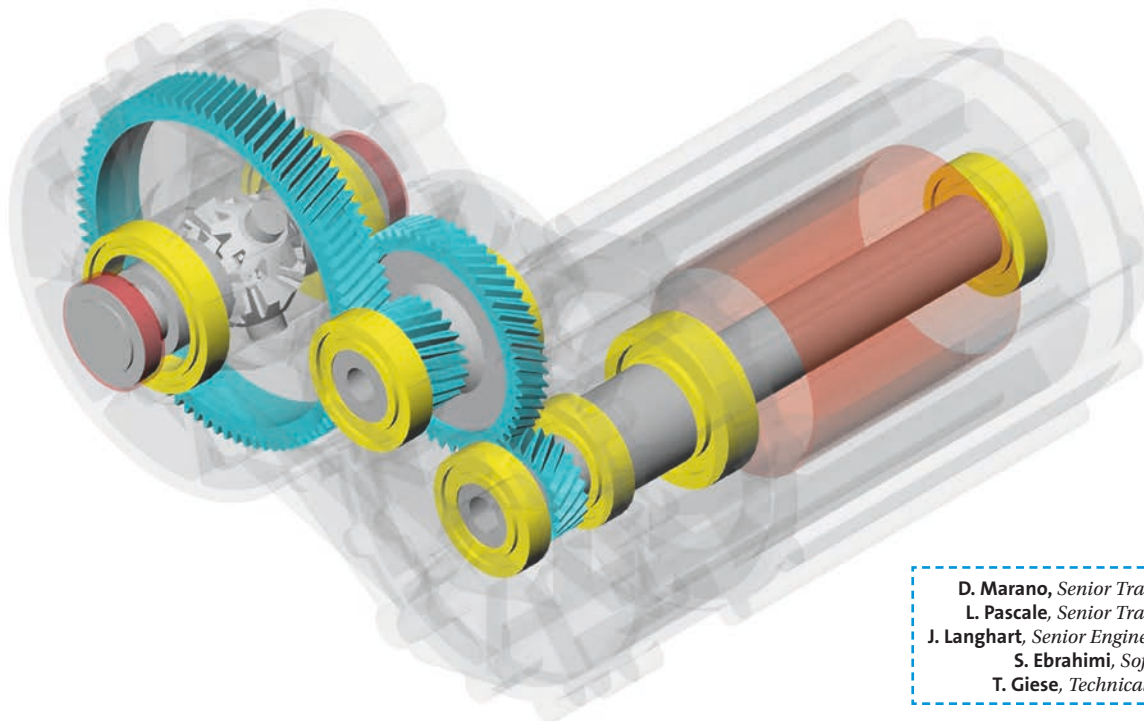


SCHWINGUNGEN PER SOFTWARE ANALYSIEREN



D. Marano, Senior Transmission Engineer, GearLAB;
L. Pascale, Senior Transmission Engineer, GearLAB;
J. Langhart, Senior Engineer – Global sales, KISSsoft AG;
S. Ebrahimi, Software Developer, KISSsoft AG;
T. Giese, Technical Director, FunctionBay GmbH

Elektrische Antriebe haben charakteristische Geräusche, die aus den elektromagnetischen Kräften, dem Antriebsstrang und anderen Quellen entstehen. Die Geräusche sind dabei nichts Anderes als Schwingungen im Antriebssystem. Um diese schon früh vorherzubestimmen und wenn möglich zu vermeiden, gibt es leistungsfähige Variantenrechnungen und Simulationssoftware.

Der im Folgenden analysierte E-Antrieb ist ein zweistufiges Getriebe mit einem Gang, welches die Vorderachse eines Elektrofahrzeugs antreibt, wie im Bild oben dargestellt. Die Auslegung und Lebensdauerberechnung des Antriebsstranges wird in KISSsys durchgeführt.

Die Leistung wird von einem Permanentmagnet-Synchronmotor über eine Keilwellenverbindung auf die Antriebswelle übertragen. Die elektrische Maschine hat $2p=6$ Pole und $s=36$ Statornuten. Die Abtriebsstufe beinhaltet auch das Differentialgehäuse. Der Differential-Triebsatz wird in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

In Bild 01 sind die Tragbilder und Eingriffsstrecken der Zahnräder für zwei Auslegungen angegeben, und zwar für Zahnräder mit niedriger Überdeckung (LCR) und Zahnräder mit hoher Überdeckung (HCR), welche eine Profilüberdeckung ϵ_{α} von über 2 erreichen. Für beide Auslegungen ist die Eingriffsordnung

der ersten Stufe 23,00 und die Eingriffsordnung der zweiten Stufe 9,98. Die Ordnung 1 bezieht sich auf die Welle der elektrischen Maschine.

GERÄUSCH- UND SCHWINGUNGSSIMULATION DES E-ANTRIEBES

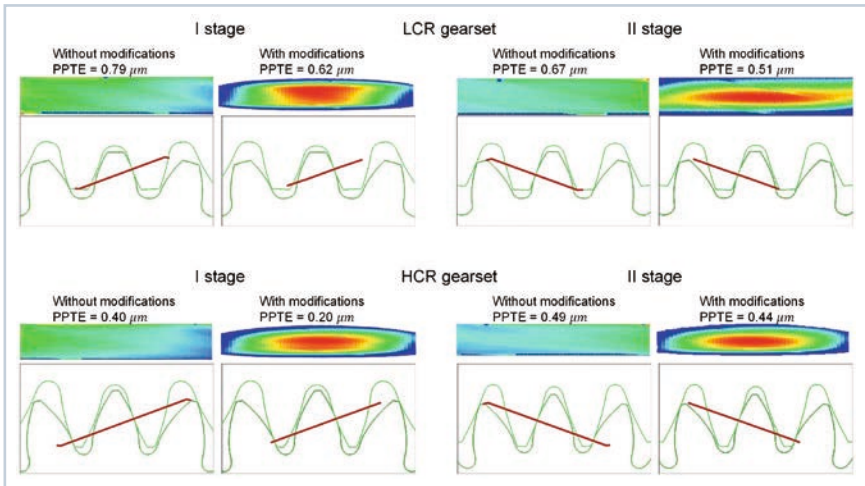
Die Simulationen werden durchgeführt, um die Optimierung des HCR-Getriebes gegenüber des LCR-Getriebes in Bezug auf die Drehwegabweichung (PPTE), den Zahneingriff und die Lagerkräfte zu bewerten. Die aus der HCR-Getriebesimulation resultierende äquivalente Abstrahlleistung (ERP) des Gehäuses wird analysiert. Die Modifikationen der Zahnrad-Mikrogeometrie wurden mit Hilfe von KISSsys entworfen: Schrägungswinkelmodifikation und Balligkeiten wurden angewendet, um den Breitenlastfaktor $K_{H\beta}$ zu reduzieren, während die Kopfrücknahme und die Profilballigkeit angewendet wurden, um den Kontaktstoß zu eliminieren und die Drehwegabweichung zu optimieren. Die folgenden Ergebnisse werden für ein Eingangsdrehmoment von 60 Nm (fast 50 % des Nenndrehmoments) bei 1000 U/min erzielt.

ANALYSE DER ERZWUNGENEN SCHWINGUNG

Die Forced-Response-Analyse wurde mit RecurDyn, einer Mehrkörperdynamik-Software (MBD), durchgeführt, wobei sich die Getriebedaten dafür aus dem KISSsys-Modell importieren lassen. Es wurden vier Simulationen nach dem folgenden Schema durchgeführt:

- LCR- und HCR-Getriebe, starres Gehäuse
- LCR- und HCR-Getriebe, flexibles Gehäuse

Um die Auswirkung einer höheren Überdeckung auf den dynamischen Übertragungsfehler und die Zahneingriffskraft besser zu



01 Auswirkung der Modifikationen auf das in mit der Software berechnete Tragbild und den statischen PPTE

verstehen – welche wiederum die transienten Lagerkräfte bestimmen – wird die erste Simulation mit starrem Gehäuse durchgeführt. Die Hauptanregungsordnungen sind wie folgt:

- Ordnungen 23 und 46: jeweils erste und zweite Harmonische der Zahneingriffsfrequenz für die erste Zahnradstufe.
- Ordnungen 10, 20 und 30: jeweils erste, zweite und dritte Harmonische der Zahneingriffsfrequenz für die zweite Zahnradstufe.

Außerdem wird das Oberschwingungsspektrum des Signals analysiert. Die Ergebnisse bestätigen eine deutliche Reduzierung der Amplituden der Eingriffsordnungen sowohl für die erste als auch für die zweite Stufe des Getriebes zwischen den HCR- und LCR-Getriebeausführungen.

Im weiteren Verlauf wurden die Zahneingriffskräfte (FM) aufgetragen und deren Oberwellen analysiert. Für den ersten Fall sind die dominierenden Ordnungen diejenigen, welche mit den Zahneingriffsfrequenzen der ersten Untersetzungsstufe zusammenhängen; für das LCR-Getriebe ist neben der Ordnung 10 und ihren Oberwellen vor allem die Ordnung 23 auffällig.

Zusätzlich wurden die Lagerkräfte verglichen und das Frequenzspektrum grafisch dargestellt. Da die Lager die dynamische Belastung auf das Gehäuse übertragen, führt eine Verringerung des Oberwellenanteils der Lagerkräfte zu einer Verringerung der Gehäuseanregung, was letztlich zu einer Reduzierung des Gesamtgeräuschpegels führt.

Bei allen Lagern hat sich die Amplitude verringert, auch wurden die meisten Oberschwingungen durch den Ersatz des LCR-Zahnradatzes durch den HCR-Zahnradatz reduziert. Bei den Lagern auf der Eingangswelle beziehen sich die Hauptordnungen auf die Eingriffsfrequenz der ersten Stufe des Getriebes und deren Oberschwingungen. Für die Lager auf der Zwischenwelle sind die Zahneingriffsfrequenzen der ersten und zweiten Stufe vorhanden. Bei den Lagern auf der Abtriebswelle beziehen sich die Hauptordnungen auf die Zahneingriffsfrequenz der zweiten Stufe und deren Oberschwingungen.

AKUSTISCHE ABSTRAHLEISTUNG (ERP)

Die akustische äquivalente Abstrahlleistung (ERP) ist definiert als:

$$e_{ERP} = f_{RLF} \cdot 1/2 \cdot C \cdot \rho \cdot \sum (A_i \cdot v_i^2) \quad (1)$$

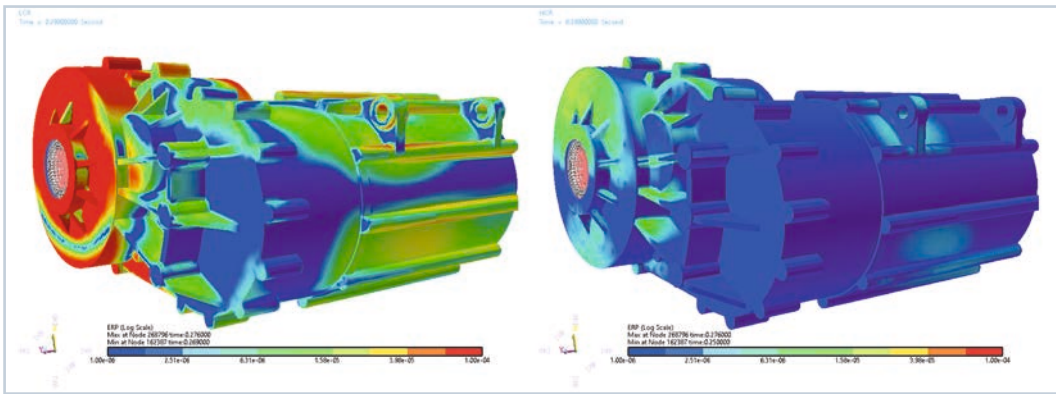
wobei f_{RLF} der Strahlungsverlustfaktor, C die Schallgeschwindigkeit, ρ die Dichte des Gehäuses, das die Schwingung (d. h. das Geräusch) auf die Luft überträgt, A_i die Fläche auf der i -ten flexiblen Platte und v_i die Flächennormalgeschwindigkeit auf der i -

DIE IDEE



„Mit unserer Methode und der verwendeten Software Kissys ist es uns gelungen, den E-Antrieb zu simulieren. So konnten zwei verschiedene Konfigurationen hinsichtlich der Geräuschentwicklung miteinander verglichen werden. Auch konnte das Ausmaß der Schwingungen am Gehäuse mit Konturdiagrammen dargestellt werden.“

Daive Marano, Senior Transmission Engineer, GearLab, Modena



02 Vergleich zwischen dem LCR-Getriebe und dem HCR-Getriebe in Bezug auf das Geräuschverhalten: die helleren Bereiche zeigen eine höhere Schalleistungsabstrahlung

ten flexiblen Platte darstellt. Weitere Details sind im Handbuch von Functionbay (2020) zu finden.

Im Bild 02 auf dieser Seite wird der Vergleich zwischen dem LCR-Getriebe und dem HCR-Getriebe in Bezug auf die äquivalente Abstrahlleistung (ERP) dargestellt: die helleren Bereiche sind repräsentativ für eine höhere Schallabstrahlleistung, was die Wirksamkeit von Hochverzahnungen zur Verbesserung des NVH-Verhaltens bestätigt. Die grafische Darstellung ist sehr hilfreich, um zu verstehen, welchen Beitrag die einzelnen Gehäusestellen zur Geräuschemission leisten, und um spätere Konstruktionsänderungen (lokale Versteifung des Gehäuses, z. B. durch Rippen) vorzunehmen.

ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik zur Analyse des NVH-Verhaltens einer E-Achse von einem Fahrzeug aufgezeigt. Das EV-Getriebe wurde mit KISSsys entworfen und die Verzahnungen mittels geeigneter Flankenmodifikationen optimiert. Die E-Achse wurde als vollflexibles Mehrkörpersystem in RecurDyn

modelliert und die erzwungene Schwingung bei konstanter Drehzahl des Elektromotors berechnet.

Das NVH-Verhalten von Getrieben mit hohem Überdeckungsverhältnis (HCR) erhielt eine dementsprechende Bewertung in Bezug auf das Standard-ISO-53-Getriebeprofil A. Die Drehwegabweichung (PPTE), der Zahneingriff und die transienten Lagerkräfte wurden für beide Konfigurationen verglichen, was die Verbesserung des NVH-Verhaltens vom E-Antrieb durch die HCR-Verzahnung im Vergleich zur LCR-Verzahnung aufzeigt.

Schließlich fand ein Vergleich von den äquivalenten Abstrahlleistungen (ERP) des Gehäuses statt, die sich aus den Simulationen des ISO-53-Profiles A und der HCR-Verzahnungen ergeben, wo eine deutliche Reduzierung der Oberflächennormalgeschwindigkeiten ersichtlich wurde. Die kritischen Bereiche für die Optimierung des Gehäuses ließen sich mit Hilfe von Grafiken aufzeigen.

Fotos: Kisssoft AG

www.kisssoft.com