

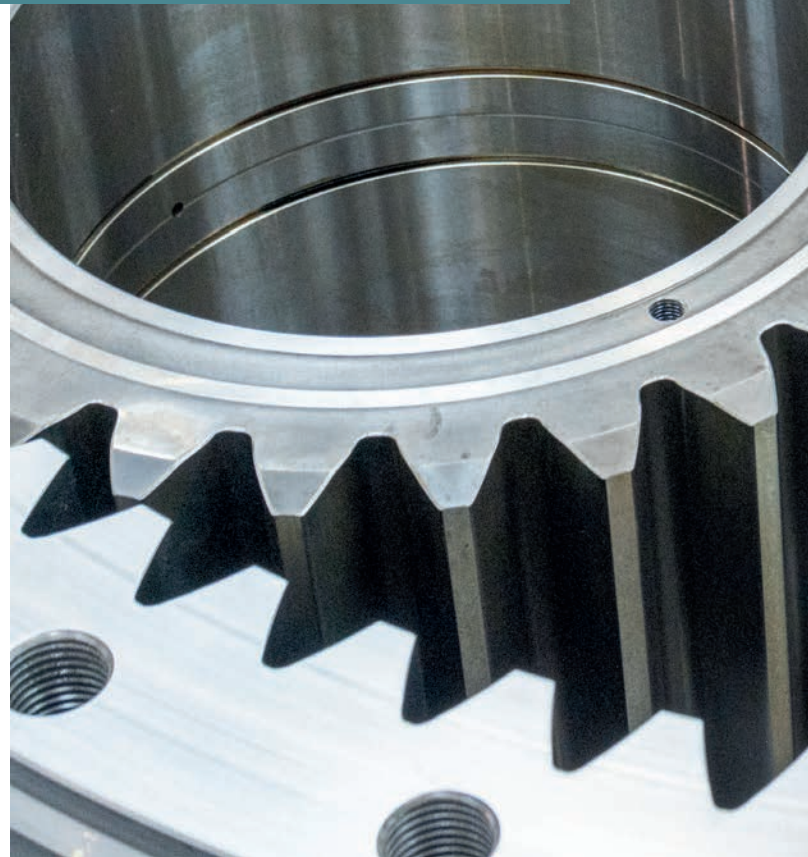
FLANKENWELBIGKEIT IN DESIGNPHASE OPTIMIEREN

PERFORMANCE-BASIERTE ZAHNRAD- BEWERTUNG MIT DEM DIGITALEN ZWILLING

Wie lassen sich über die Optimierung der Zahnradqualität und deren Beurteilung Ausschusskosten reduzieren? Der im Artikel vorgestellte Ansatz mit Digitalem Zwilling schon für die Designphase gibt Antworten.

Übermäßige Schall- und Schwingungsemissionen sowie Abweichungen in den Tragbildern zum Zielwert werden hierbei als Qualitätskriterien herangezogen. Traditionelle Bewertungsmethoden basieren hingegen auf geometrischen Messungen und Auswertungen.

Oft erweisen sie sich als kostspielig, da sie nicht immer ausschlaggebend (falsch-negativ) sind, und sie liefern zudem auch erst spät im Fertigungsprozess Ergebnisse. Dies führt aber zu Verzögerungen und unnötig hohen Ausschussquoten.



Das Kernziel des vorgestellten Ansatzes ist die Vorhersage von Anregungen und Schwingungen sowie der Tragbilder und Spannungsverteilungen bereits in der Designphase. Die gewählte Makro- und Mikrogeometrie der Verzahnungen wird hierbei im Detail berücksichtigt.

Darüber hinaus soll die Performance hergestellter Zahnräder durch die Verwendung Digitaler Zwillinge bewertet werden. Diese digitalen Abbilder ermöglichen detaillierte Analysen innerhalb einer Getriebeauslegungs- und -analyse-Software wie KISSsoft. Dazu gehören a) Geometrieanalyse (zum Beispiel Eingriffsstörungen, Einfluss der Toleranzen auf Überdeckung et cetera), b) lastfreie Kontaktanalyse, c) die entscheidende Kontaktanalyse unter Last (LTCA) und d) die Analyse erzwungener Schwingungen. Die Resultate dieser Berechnungen können direkt mit den Zielwerten des ursprünglich ausgelegten Zahnrads verglichen werden.

Eine wesentliche Neuerung dieses Ansatzes ist die Erweiterung der Qualitätsprüfung über die reine Einhaltung geometrischer Grenzwerte hinaus, wie zum Beispiel Oberflächenrauheit oder Formtoleranzen nach ISO 1328. Stattdessen konzentriert sich die Methode auf Performance-Kennzahlen wie Drehwegfehler (TE, PPTE, Spektrum), Zahnflankenpressung, die Lage des Tragbildes oder das Risiko für Graufleckigkeit. Diese technische Analyse, die

auf der Vermessung oder Prognose von Herstellungsfehlern basiert, ermöglicht präzisere und vor allem anwendungsorientiertere Entscheidungen über die Akzeptanz oder den Ausschluss gefertigter Chargen. Letztlich trägt dies zur Senkung von Ausschuss und damit von Kosten bei.

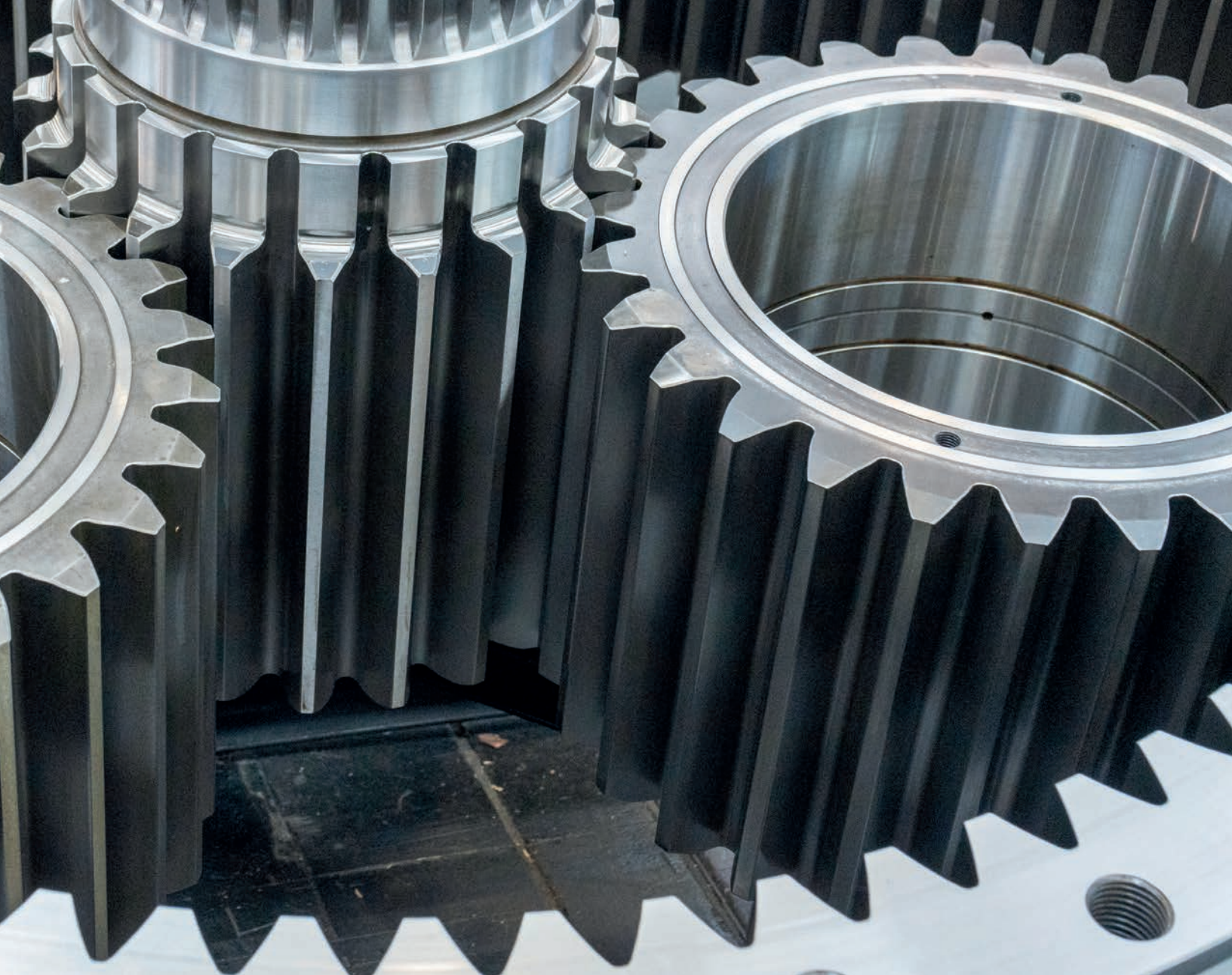
PERFORMANCE-BASIERTE BEWERTUNG

Der Closed-Loop-Ansatz und der Digitale Zwilling sind hierbei zentral. Dabei wird die real gemessene Geometrie mehrerer hergestellter Zahnräder zurück in die ursprüngliche Zahnradauslegungssoftware eingelesen. Dort wird durch die Kombination

„ DIE SOFTWARE VERWALTET REFERENZZAHNRÄDER MIT PERFORMANCE-ZIELWERTEN

der gemessenen Geometrie mit der ausgelegten Geometrie ein Digitaler Zwilling des physischen Zahnrads erstellt. Für den Digitalen Zwilling können nun dieselben Performance-Kennzahlen berechnet werden, die bereits für das ausgelegte Zahnrad ermittelt wurden. Ob Zahnradfestigkeit, Zahnkraftpegel oder Tragbild: Sie können nun für das hergestellte Zahnrad (oder das Paar) berechnet werden.

Hanspeter Dinner, *Managing Director*, und **Calogero Principato**, *Senior Engineer*, beide KISSsoft AG – A Gleason Company, Bubikon in der Schweiz



Der Designingenieur kann also Fertigungsabweichungen über die Leistungsfähigkeit (zum Beispiel Tragfähigkeit) bewerten – nicht nur nach geometrischen Abweichungen. Die Entscheidung über das Aussortieren einer Zahnradcharge mit Geometrieabweichungen basiert somit auf relevanten Performance-Kennzahlen wie der Festigkeit, Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Drehwegabweichung oder Fresssicherheit. Der Designingenieur muss sich mit hin nicht mehr ausschließlich auf die Genauigkeitsklasse stützen.

Die Software KISSsoft erlaubt die Verwaltung von Referenzzahnradern mit Zielwerten für die Performance-Kriterien und unterstützt dabei beliebig viele Digitale Zwillinge gleichzeitig. Hierzu werden diese als Geometrievarianten definiert. Die Referenzauslegung und die digitalen Zwillinge werden dann zum Beispiel einer LTCA (Analytical Tooth Contact Simulation) unterzogen. Die Ergebnisse werden hinsichtlich Drehwegfehler, Kontaktspannungen oder Tragbildform und -lage verglichen. Abweichungen innerhalb akzeptabler Grenzen führen zur Freigabe. Zu große Abweichungen führen hingegen zur Ablehnung.

ETABLIERTER ANSATZ

Der bisherige Stand der Technik zur Erstellung eines Digitalen Zwillings basiert auf einer Rasterpunkt-Messung auf der Zahnflanke. Hierbei werden die gemessenen Koordinaten mit den aus der Makro- und Mikrogeometrie des Zahnrades berechneten Werten verglichen. Abweichungen werden zur Erstellung des

Digitalen Zwillings rückgekoppelt. Die ausgelegte Makrogeometrie wird in einem Gleason GAMA-kompatiblen Dateiformat oder im GDE-Format exportiert, und Rasterpunkte können zwischen KISSsoft und GAMA übertragen werden.

Eine typische Messung umfasst beispielsweise 8 x 8 Punkte, deren Abweichungen in einer Tabelle dargestellt und in die Getriebeauslegungssoftware importiert werden, um das ausgelegte Zahnrad zu modifizieren und den Digitalen Zwilling zu erstellen. Dieser Ansatz ist bereits zur Bewertung von Zahntragbildern, Lastverteilung und typischen Fertigungsfehlern wie Eingriffswinkel-, Schrägungswinkel-, Balligkeitsfehler oder fertigungsbedingtem Twist geeignet.

REALISTISCHE FLANKENWELBIGKEIT EINBEZIEHEN

Der nächste Schritt und eine wesentliche Verbesserung ist die Messung der Flankenwelligkeit. Die 8 x 8-Punktmessung liefert keine Informationen über die Flankenform zwischen den Messpunkten. Ein verfeinerter Ansatz erfasst nicht nur einzelne Punkte, sondern ganze Pfade in Flankenlinien- und Profilrichtung, was einer wesentlich höheren Anzahl von Datenpunkten bedeutet. Diese in der Gleason GAMA-Software gemessenen Pfade zeigen Welligkeiten, welche in der Getriebeauslegungssoftware abgebildet werden sollen, um das Zahnradmodell mit der realen Welligkeit zu versehen.



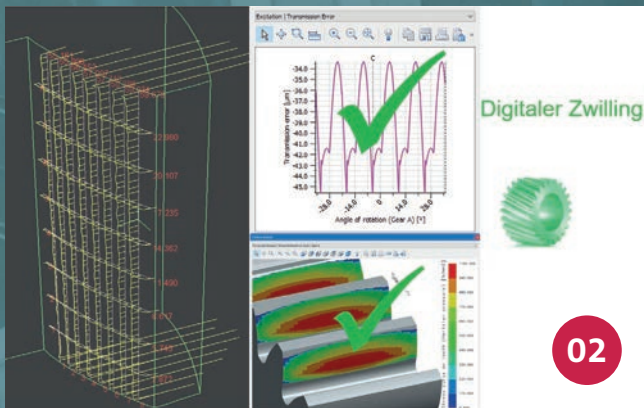
01

01 Blick in eine Wälzschälmaschine (Power Skiving) von Gleason zur Herstellung von Innen- und Außenverzahnungen: Für das konstruierte Zahnrad können Leistungsparameter wie Drehwegabweichung und Flankenpressungsverteilung zwar berechnet werden, für das gefertigte Zahnrad sind diese Parameter jedoch nicht bekannt

02 Erst nach der Vermessung und dem Erzeugen des Digitalen Zwillings können die Leistungsparameter des gefertigten Zahnrades bestimmt und mit den Zielwerten verglichen werden

03 Oben, links: Konstruierte Modifikationen (Balligkeit) und simulierte Welligkeit überlagert. Oben, rechts: Resultierende Kontaktspannungsverteilung auf der Flanke, beachte das Muster aufgrund der Welligkeit. Unten: Kontaktspannung im Eingriffsfeld, links für gemessene (und angenäherte) Verzahnung, rechts für die Referenzverzahnung

04 Farblich codierte Darstellung der Schwingungsamplitude auf der Gehäuseoberfläche (links: Berechnung ohne Welligkeit auf der Verzahnung; rechts: mit Welligkeit)

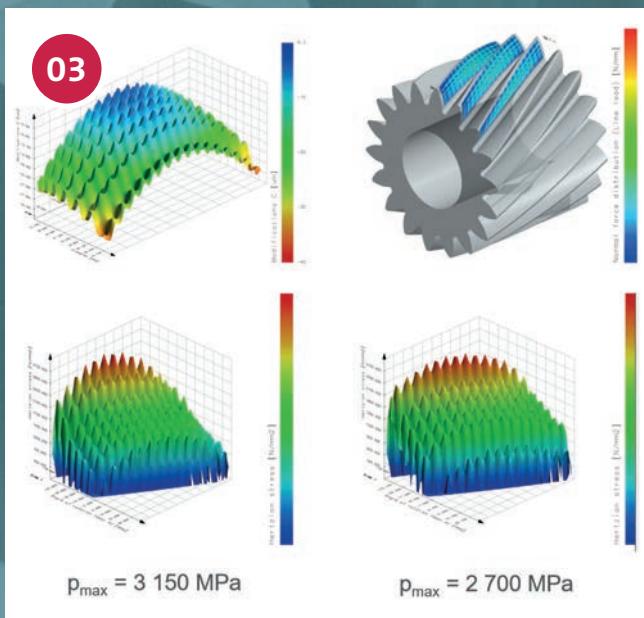


02

Obwohl Digitale Zwillinge mit diesem Ansatz deutlich mehr Informationen enthalten, war es bislang nur möglich, einen Pfad in Flankenlinien- und einen Pfad in Profilrichtung (oder einen schrägen Pfad) zu importieren. Dies basiert auf der Annahme, dass die Welligkeit ein systematisches Ergebnis des Fertigungsverfahrens ist und daher in erster Näherung entweder in Profilrichtung entlang der Zahnbreite oder in Flankenlinienrichtung entlang der Profilrichtung konstant ist.

Die Welligkeit wird dreidimensional dargestellt, wobei die vertikale Achse die Abweichung der gemessenen Fertigungsgeometrie von der ausgelegten Geometrie darstellt. Auffällig ist die Welligkeit in einer Richtung und die Verschränkung der Ebene durch den fertigungsbedingten Twist. Im Zahneingriff überlagert sich die Welligkeit an mehreren Berührungspunkten. Eine sinusförmige Welligkeit wird durch Amplitude, Wellenlänge, Neigungswinkel und Phasenverschiebung definiert. Ein Winkel von 0° erzeugt Welligkeit in Profilrichtung und 180° in Flankenlinienrichtung.

Mehrere solcher Welligkeitsdefinitionen können sich überlagern, was eine „raue“ Zahnradflanke erzeugt und unterschiedliche maximale Spannungsspitzen zur Folge hat. Dieser Ansatz kann helfen, die Entstehung von Graufleckigkeit in einem schleifspurenartigen Muster zu erklären. Durch Überlagerung mehrerer Sinusformen mit unterschiedlicher Phasenverschiebung, Amplitude und Wellenlänge in Profilrichtung entsteht eine zusammengesetzte Welligkeit, die realistisch aussieht und nicht sofort als Überlagerung von Sinusformen erkennbar ist. Durch Erhöhen der Amplitude kann auch der Verschleiß eines Werkzeugs und die Zunahme der Welligkeit zwischen den Abrichtvorgängen berücksichtigt werden. Zukünftige Software-Updates sollen nun die Erstellung dieser einzelnen Sinusformen automatisieren.



03

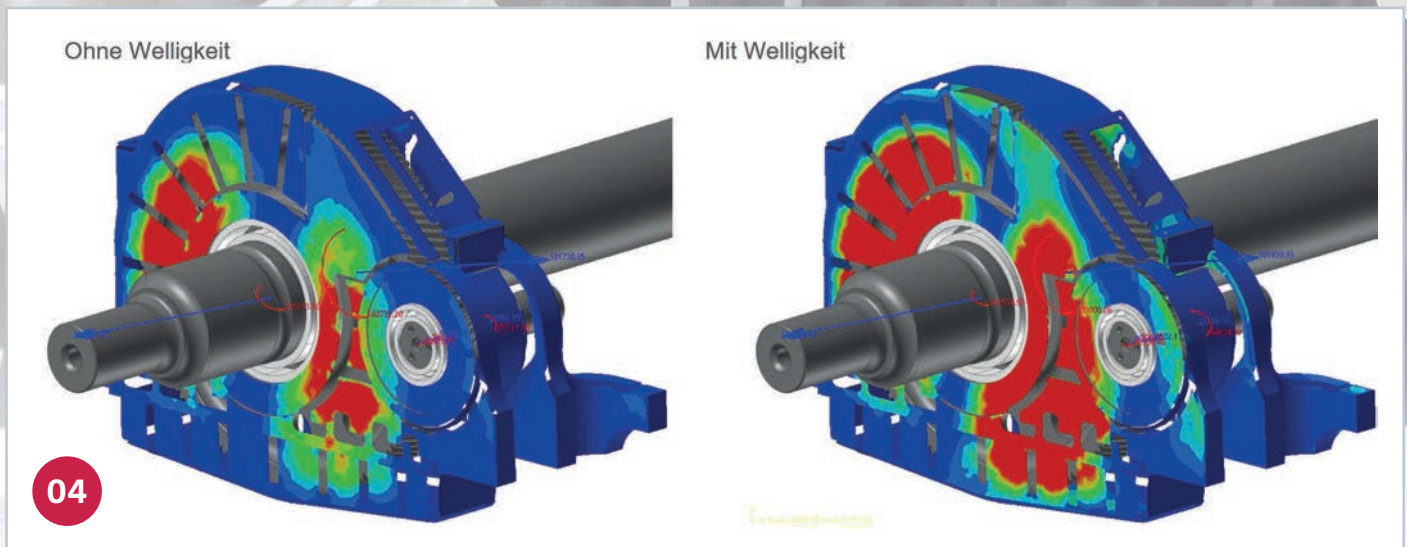
$p_{max} = 3150 \text{ MPa}$

$p_{max} = 2700 \text{ MPa}$

WELLIGKEIT UND DREHWEGFEHLER

Der Einfluss der Welligkeit auf berechnete Performance-Merkmale wie Drehwegfehler und Lastverteilung wird an einem geradzahnenden Ritzel-Zahnrad-Paar veranschaulicht. Vergleichende Berechnungen wurden für eine Referenz (nur Höhenballigkeit), eine Referenzamplitude der Welligkeit und eine verdoppelte Amplitude durchgeführt. Die Linienlast zeigte dabei kaum Veränderungen, während der PPTE-Wert (Drehwegfehler-Schwingbreite) nicht proportional zur Welligkeit anstieg.

Das wichtigste Ergebnis war die Zunahme der Amplituden höherer Ordnung im Drehwegfehler-Spektrum bei Zahnradern mit Welligkeit, was den direkten Einfluss der Welligkeit auf den Drehwegfehler belegt. Die Welligkeit beeinflusst die Performance-Merkmale negativ, weil Spannungen und PPTE zunehmen. Die



PPTE-Zunahme ist ein Indikator für eine stärkere Anregung des Getriebegehäuses.

GEHÄUSESCHWINGUNG

Im nächsten Schritt wurde die Gehäuseschwingung in einem einstufigen Bahngetriebe untersucht. Die Variation der Zahneingriffskraft, berechnet mit LTCA in Kisssoft, betrug 2.110 N für das Zahnrad ohne Welligkeit und 2.500 N für das Zahnrad mit Welligkeit. Diese erhöhte Variation der Zahneingriffskraft führte zu einer Variation der Lagerkräfte, die aus Kisssoft exportiert und in RecurDyn importiert wurden, um eine dynamische Analyse des Gehäuses durchzuführen. An kritischen Stellen des Gehäuses wurden virtuelle Beschleunigungsmesser angebracht, um Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung im Zeitbereich zu messen.

Die im Zeitbereich gewonnenen Resultate wurden mittels einer Fourier-Transformation in den Frequenzbereich umgewandelt. Es zeigte sich, dass die Gehäusegeschwindigkeit des Zahnrad mit Welligkeit eine höhere Amplitude (4,75 m/s) bei der Zahneingriffsfrequenz (825 Hz) aufwies, verglichen mit 3,58 m/s ohne Welligkeit – ein Anstieg von 33 Prozent.

Diese Ergebnisse legen nahe: Die vorgestellten Methoden und Tools erweisen sich als vielversprechend, um das Geräuschverhalten eines Getriebes zu verbessern. Obwohl weitere Untersuchungen notwendig sind, eignet sich dieser manuelle Ansatz, der technisches Urteilsvermögen erfordert, derzeit für spezielle Projekte oder Fehleranalysen, nicht aber für die Routine-Qualitätsprüfung von Tausenden von Zahnradern. Für geräuschsensible Anwendungen mit wenigen Getriebeeinheiten (wie etwa Marine-Getriebe) oder kritische Anwendungen mit vielen Einheiten, die mit einem konsistenten Fertigungsverfahren hergestellt werden (zum Beispiel Luftfahrt- oder EV-Getriebe), liefert das Verfahren jedoch vielversprechende Ergebnisse.

DIGITALE ZUKUNFT DER ZAHNRADAUSLEGUNG

Zukünftige Arbeiten konzentrieren sich auf die Verbesserung des Modells und der verwendeten Tools. Modellverbesserungen umfassen die Erhöhung der Auflösung des Digitalen Zwillings, die automatische Näherung von Pfaden basierend auf Sinusformen und die automatische Datenübertragung zwischen Kisssoft und GAMA. Zudem soll die Berechnung auf die äquivalente Abstrahlleistung (ERP) als Maß für die Geräuschemission des Gehäuses erweitert werden. Des Weiteren sind projektbezogene Koopera-

tionen mit Industriepartnern, die Anpassung der Methoden an verschiedene Produkttypen und die Erweiterung auf Kegelräder geplant. Zurzeit wird der Einfluss der Welligkeit auf die Gehäuseanregung untersucht.

Ein entscheidender Aspekt dieser Entwicklung ist das von der Kisssoft AG angemeldete Patent WO2023208958A1. Dieses Patent beschreibt ein Verfahren zur Prognose und Minimierung des Geräuschverhaltens von Zahnradpaaren, das für die Verbesserung der Geräusch- und Vibrationseigenschaften in Getrieben, insbesondere in Elektrofahrzeugen, von großer Bedeutung ist. Der Fokus liegt auf der Messung und Analyse von Abweichungen in Zahnflanken mittels Fourier-Transformation, um spezifische Schwingungsfrequenzen zu lokalisieren, die zur Geräuschenstärkung beitragen.

Im Gegensatz zu klassischen Ansätzen, die Abweichungen pauschal betrachten, filtert diese Erfindung gezielt jene Oberflächenabweichungen heraus, die den größten Einfluss auf die Ge-

„ DIE ANALYSE SPEZIFISCHER FREQUENZEN ERMÖGLICHT EINE PRÄZISE OPTIMIERUNG

räuschenentwicklung haben. Die Fourier-Analyse zerlegt die Daten der Zahnoberflächenabweichungen in einzelne Frequenzanteile, einschließlich erwarteter „Eingriffsfrequenzen“ und unerwarteter „Geistfrequenzen“. Die Analyse dieser spezifischen Frequenzen ermöglicht eine präzise Optimierungen in den Auslegungs- und Fertigungsphasen. Das Verfahren lässt sich an Feedback aus tatsächlichen Geräuschmessungen, wie zum Beispiel aus End-of-Line-Prüfungen, anpassen, um Störfrequenzen auf ihre Ursachen zurückzufolgen. Die Umsetzung erfolgt über übliche Verzahnungsprüfmaschinen mit taktilen oder berührungslosen Sensoren und die Integration in Software wie Kisssoft.

Dieser Ansatz ist ein bedeutender Fortschritt in der Zahnradauslegung. Er ermöglicht Herstellern, Getriebesysteme mit reduzierten Geräuschemissionen zu entwickeln und zu einer langlebigeren, leistungsstärkeren Getriebeherstellung mit geringerer NVH-Performance (Geräusche, Schwingungen und Rauigkeit) beizutragen.

Bilder: Aufmacher Germanalberto – stock.adobe.com, 01 Gleason, sonstige Kisssoft

www.kisssoft.com