

EINFLUSS VON HERSTELLABWEICHUNGEN AUF DAS NVH-VERHALTEN

In diesem Artikel wird eine Methode vorgestellt, mit der der mögliche Einfluss von Herstellabweichungen auf die NVH-Performance (Noise, Vibration, Harshness) für eine bestimmte Verzahnungsqualität statistisch ausgewertet werden kann. Dazu werden auf die theoretisch ideale Zahnflanke sinusförmige Welligkeiten aufgebracht, um die Abweichungen zu simulieren. Mit dieser Methode können verschiedene Zahnradtypen untersucht werden: LCR-, normale und HCR-Zahnräder, mit Grad- oder Schrägverzahnung sowie mit oder ohne Modifikationen.

Im letzten Schritt der Zahnradauslegung muss der Fachmann in der Regel ermitteln, welche Zahnflanken- und Profilmodifikationen erforderlich sind, um Zahnschäden durch Verformung unter Last zu vermeiden. Sehr wichtig sind heute gezielte Modifikationen zur Minimierung von Vibrationsanregung (Geräusch) oder Verlusten (Wirkungsgrad). Solche Zahnflankenmodifikationen werden nach rein funktionalen Gesichtspunkten vorgenommen. Zumeist sind es Balligkeiten in Profil- und Zahn-längsrichtung, die sicherstellen, dass für jeden Betriebspunkt des Getriebes ein akzeptabler Zahnkontakt vorliegt.

Es liegt in der Natur der Sache, dass sich Zahnflankenmodifikationen, die nach rein funktionalen Gesichtspunkten definiert werden, in der Regel nur näherungsweise herstellen lassen. So wird es dann zur Aufgabe der Fertigung, diese funktionsorientierten Zahnflankenmodifikation so gut wie möglich anzunähern.

Die Zahnradbearbeitung findet auf Basis der Werkzeuggeometrie und der Bearbeitungskinematik statt. Die Kinematik wird durch die Steuerung anhand der theoretischen Zahnrad-daten und der gewünschten Zahnflankenmodifikationen berechnet. In den meisten Fällen erstellt die Konstruktionsabteilung ein Ge-

triebedesign ohne wesentliche Absprache mit der Fertigung. Wird, wie heute üblich, die Fertigung outgesourct, ist für gewöhnlich während der Entwurfsphase auch noch nicht festgelegt, wer die Zahnräder produziert und mit welcher Methode.

Jede Fertigungsmethode hat spezifische Eigenschaften, welche es erlauben, gewisse Zahnflankenmodifikationen gut, passabel oder gar nicht auszuführen. Fest steht: Kein Fertigungsprozess ergibt ein fehlerfreies Zahnrad, doch je nach den erforderlichen Modifikationen und der verfügbaren Herstellmaschine können mehr oder weniger starke Abweichungen entstehen.

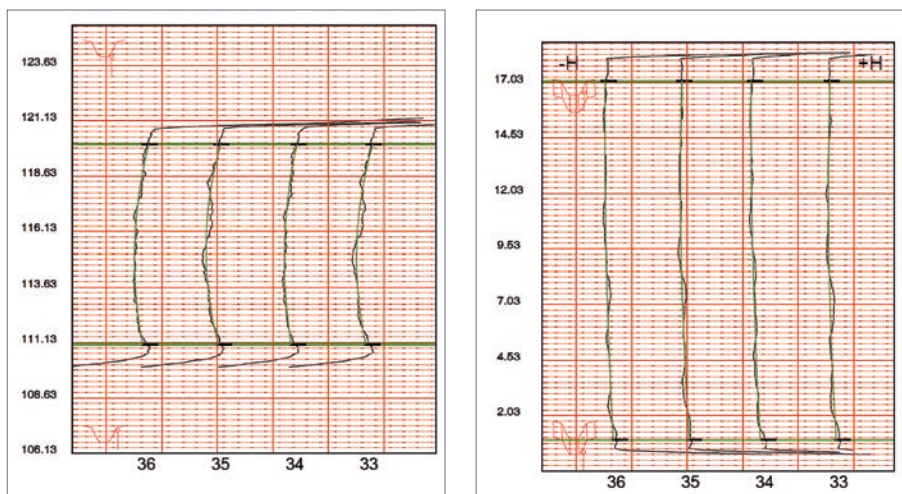
TOLERANZEN, VERHALTEN UND HERSTELLUNGSKOSTEN

Der Maschinenbediener in der Fertigung steht vor dem Problem, eine Modifikation herzustellen, die rein mathematisch so nicht herstellbar ist. Also behilft er sich mit einer mehr oder weniger guten Näherung an die gewünschte Modifikation. Gelingt es dann, innerhalb der vorgeschriebenen Toleranz das Zahnrad herzustellen, ist er zufrieden. Herstellabweichungen werden bei der Kontrolle über die Profil- und Flankenlinienabweichungen geprüft.

Für die Zahnradherstellung ist ein sinnvolles Toleranzintervall erforderlich, da die Herstellkosten sonst zunehmen. Die Frage ist, ob sich ein innerhalb der vorgegebenen Toleranzen hergestelltes Zahnrad tatsächlich so verhalten wird, wie vom Konstrukteur vorgesehen.

Der Konstrukteur wünscht natürlich, dass seine – zum Beispiel speziell für vibrationsarme Zahnradauslegungen im EV-Bereich vorgegebenen – Modifikationen möglichst formgenau eingehalten werden. In der Praxis wird deshalb insbesondere die Profil-Formabweichung oft sehr stark eingeschränkt. Teilweise werden hier Vorgaben gemacht, welche fast nicht mehr herstellbar sind und dementsprechend die Zykluszeit und damit die Herstellkosten wesentlich erhöhen. Die Frage stellt sich deshalb, ob

01 Beispiel einer Messung des Profils (links) und der Flankenlinie (rechts) an den Zähnen Nr. 33 bis 36 eines Zahnrads $m_n = 2,28$, $z = 43$, $\alpha = 19^\circ$, $\beta = 33^\circ$



02 Auswahl und Eingabe von Welligkeiten in KISSsoft

Manufacturing deviations					
Gear	Flank	Deviation type	Value [μm]	Factor 1	Factor 2
Gear 1	both	Profile form deviation f _{ffa}	4.0000	2.5000	1.2000
		Natural twist from flank line crowning (generatio...			
		Measured manufacturing deviation			
		Profile form deviation f _{ffa}			
		Profile slope deviation f _{Hα}			
		Helix form deviation f _{ffβ}			
		Helix slope deviation f _{Hβ}			
		Waviness due to manufacturing			

die geforderte hohe Qualität überhaupt noch wesentliche Verbesserungen bringt oder ob beispielsweise eine geschickt ausgelegte Profilmodifikation nicht mehr Wirkung zeigt als die reine Reduktion der zugelassenen Herstellabweichungen.

Modifikationen werden auf ein bestimmtes NVH-Verhalten und/oder eine optimale Lastverteilung ausgelegt. Die grundlegende Fragestellung lautet also: Wie beeinflussen Herstellabweichungen das gewünschte NVH-Verhalten und/oder die Lastverteilung von Zahnrädern?

HERSTELLABWEICHUNGEN

Die Analyse von Zahnradprofilmessungen zeigt immer eine Streuung des Signals, welchem meistens eine gewisse Grundwelligkeit überlagert ist (Bild 01). Die Größe dieser Welligkeit beeinflusst direkt die resultierende Profil-Formabweichung.

Es ist logisch, dass Welligkeiten auf der Zahnflanke die Ursache von Vibrationsanregungen sind oder sein können [4]. Andererseits ist auch bestätigt worden, dass die Anregung nicht proportional zur Amplitude oder zur Länge der Welligkeit sein muss [5]. Eine gewisse Welligkeit kann sogar eine Verbesserung des Geräuschverhaltens ergeben. An der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebesysteme (FZG) der TU München wurden entsprechende Versuche durchgeführt und nachgewiesen, dass mit einer genau vorgegebenen Welligkeit eine deutliche Geräuschverbesserung erzielt werden kann [3, 6].

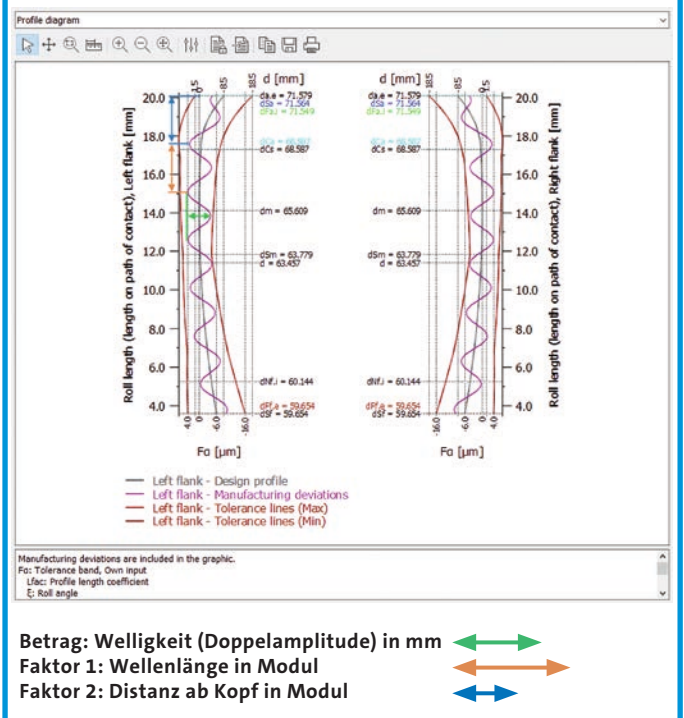
Hiervon ausgehend ist die Idee entstanden, auf eine theoretisch optimal ausgelegte Verzahnung (mit und ohne Modifikationen) zusätzlich eine Welligkeit aufzubringen und damit zu prüfen, welchen Einfluss eine solche „Verfälschung“ auf die gewünschten Eigenschaften hat. Zunächst sollte ein Zahnpaar im theoretischen, fehlerfreien Zustand mittels Kontaktanalyse unter Last (LTCA) auf die üblichen wichtigen Eigenschaften wie Drehwegabweichung, Kraftanregung, Hertzsche Pressung, Verlust etc. untersucht werden.

Anschließend wird die gleiche Verzahnung mit einer zusätzlichen Welligkeit versehen, damit nachgerechnet und die Abweichung von den Resultaten der ersten Berechnung bestimmt. Die Größenordnung der Welligkeit sollte sinnvollerweise der Formabweichung (f_{fa} für das Profil bzw. f_{β} für die Flankenlinie) gemäß der vorgesehenen Verzahnungsqualität (zum Beispiel nach ISO 1328 [8]) entsprechen.

MITTELS SOFTWARE PRÜFEN

Idealerweise sollte der Einfluss von Herstellabweichungen auf ein gewünschtes NVH-Verhalten schon in der Entwurfsphase getestet werden. Erfahrungsgemäß sind bestimmte Arten von Modifikationen stabiler gegenüber Abweichungen als andere. Bekannt ist auch: Mit unterschiedlichen Modifikationen können ähnliche NVH-Verbesserungen erreicht werden. Es bräuchte da-

03 Darstellung der Welligkeit im Profildigramm



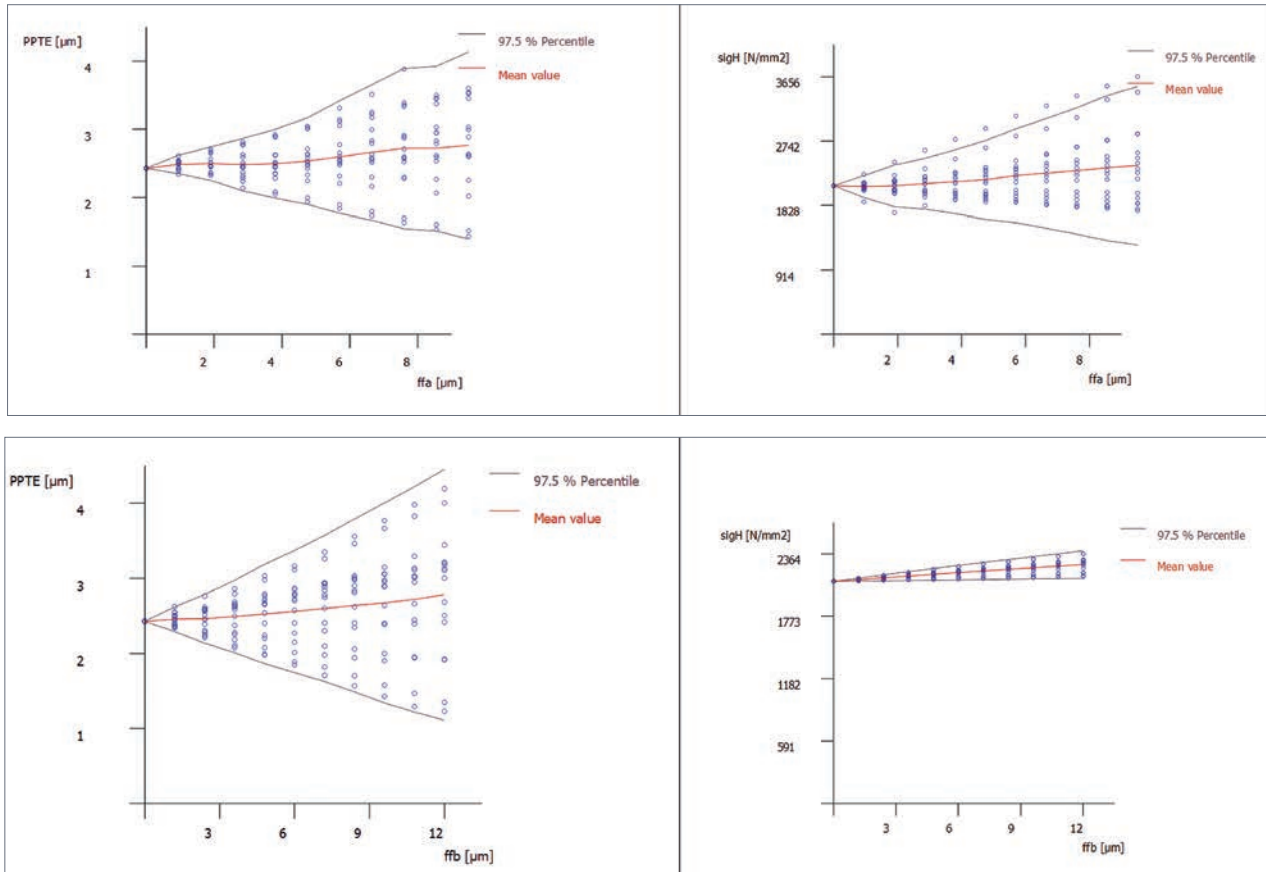
her ein Verfahren, das zeigt, wie stabil eine theoretisch ausgelegte Modifikation gegenüber einer abweichungsbedingten Veränderung des Zahnradverhaltens ist. Mit diesem Verfahren muss es zugleich möglich sein, auch die maximal akzeptierbare Abweichung zu ermitteln und damit die vorzuschreibende Verzahnungsqualität (ISO 1328) festzulegen.

INTEGRATION IN GETRIEBEAUSLEGUNGS-SOFTWARE

Um diese Berechnung durchzuführen, wurde in KISSsoft [2] im Tab „Herstellung“ für den Anwender eine Tabelle eingeführt, in der Herstellabweichungen definiert werden können (Bild 02). Die fertigungsabhängige Abweichung der Flanke kann entsprechend der Tabelle als Welligkeit nur in Profilrichtung, nur in Flankenrichtung oder in Bearbeitungsrichtung simuliert werden. Eingaben können durch Mehrfacheingaben von Abweichungen auch kumuliert werden.

Eine wichtige Problematik bei der Bestimmung des Einflusses der Welligkeit auf den Zahneingriff ist, dass Welligkeit aus Herstellung von Zahn zu Zahn sowie von Werkstück zu Werkstück variieren kann. Die Länge der Welle, der Start der Welle sowie

04 Industriegetriebe, $m_n = 3,25$, $z = 19:90$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 15^\circ$, ohne Modifikationen; Drehwegfehler PPTE (links) und σ_{Hmax} (rechts) berechnet; oben: Einfluss der Profil-Formabweichung f_{fa} von 0 bis 9,5 μm (Qualität 6); unten: Flankenlinien-Formabweichung f_{fb} von 0 bis 12 μm



die Amplitude werden nach dem Zufallsprinzip variieren. Dies ist gut ersichtlich auf Auswertungen von Zahnrad-Messmaschinen [5]. Um die Streuung dieser Parameter zu analysieren, muss eine große Anzahl von Berechnungen durchgeführt werden. Die Welle wird mit Amplitude, Länge und Start kreuzvariiert, für jede Variante werden über eine Kontaktanalyse die wesentlichen Ergebnisse berechnet und dann dargestellt (**Bild 03**).

Wenn dieses Vorgehen Schritt für Schritt mit manuellen Berechnungen durchgeführt werden muss, dann wird es extrem zeitaufwendig. Der Einsatz der in KISSsoft [1] eingebauten Skript-Sprache ist hier eine elegante Lösung. Mit einem Skript-Editor kann der Berechnungsingenieur innerhalb der Software eigene

Funktionen schreiben und ausführen. Dies erlaubt dann, die Berechnung der Kontaktanalyse mit variiertem Welligkeit automatisiert in großer Zahl durchzuführen, die Resultate zu speichern und in einer Übersicht darzustellen.

ERGEBNISSE

Eine Kontaktanalyse (LTCA) ergibt viele interessante Resultate wie den Drehwegfehler (PPTE) oder die Kräfteanregung beim Zahneingriff. Diese sind gute Indikatoren für die Schwingungs- und Geräuschanregung. Ein weiteres Resultat ist die Verteilung der Hertzischen Pressung über die Zahnbreite. Die Lebensdauer

Definition der Welligkeit

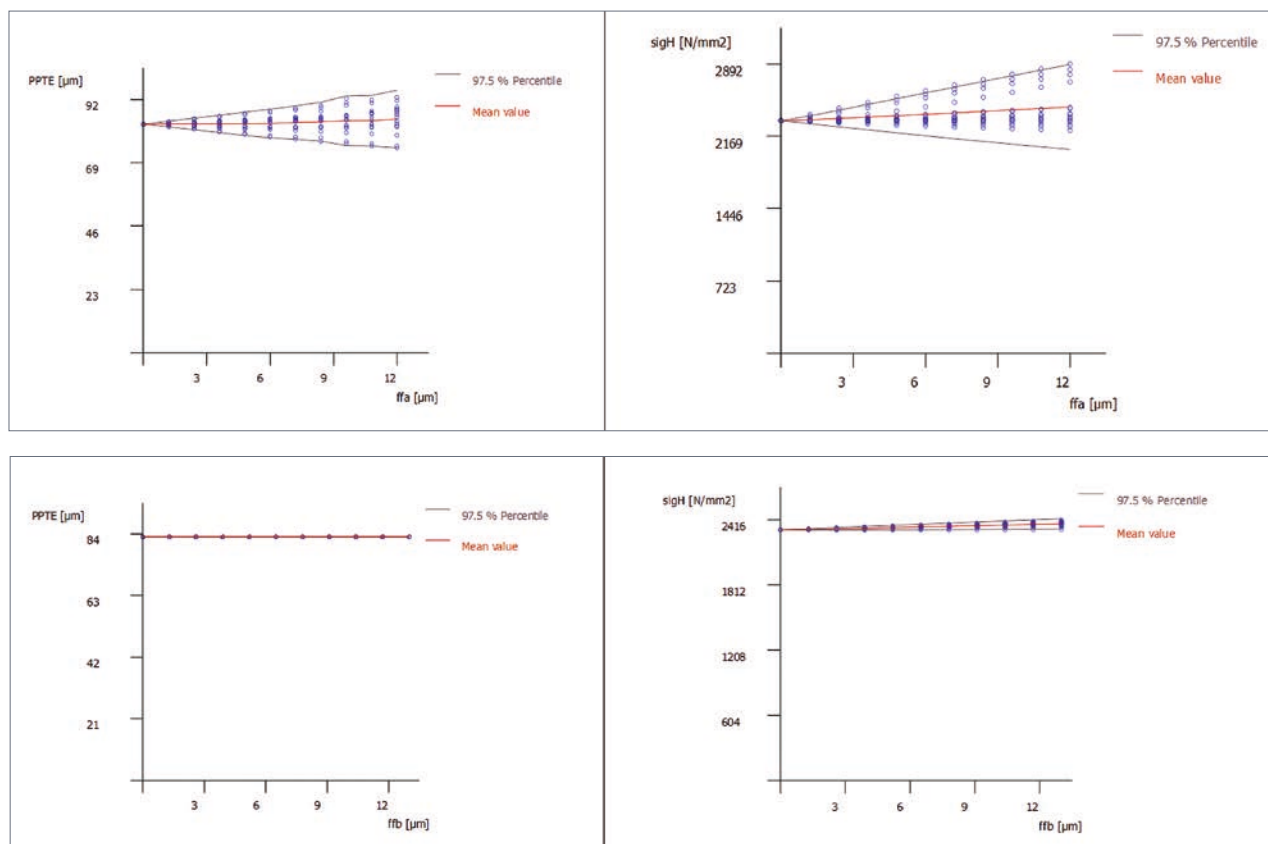
Eingaben	Simulation der Formabweichung f_{fa}	Simulation der Formabweichung f_{fb}	Welligkeit in Herstellungs-Richtung
„Betrag“, μm	Amplitude *2	Amplitude *2	Amplitude *2
„Faktor 1“	Länge der Sinus-Welle in Modul (Wälzlänge)	Länge der Sinus-Welle in Modul	Länge der Sinus-Welle in Modul
„Faktor 2“	Distanz Zahnkopf bis zum Größtwert der Welle (siehe Bild 03)	Distanz Seite I bis zum Größtwert der Welle	Schrägungswinkel der Welligkeit β_{well}
Verwendete Formel	1)	2)	3)

- 1) $\Delta f_{\alpha} = \text{Betrag}/2 * [1 - \sin(2 * \pi * (0,25 - \text{Faktor } 2 / \text{Faktor } 1 + L(y) / \text{Faktor } 1 / mn))]$
- 2) $\Delta f_{\beta} = \text{Betrag}/2 * [1 - \sin(2 * \pi * (0,25 - \text{Faktor } 2 / \text{Faktor } 1 + b(x) / \text{Faktor } 1 / mn))]$
- 3) $\Delta f_{\alpha}, \Delta f_{\beta}$ in Abhängigkeit von β_{well}

05 Industriegetriebe, $m_n = 20$, $z = 19:29$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0^\circ$, mit Flankenlinienmodifikationen;

Drehwegfehler PPTE (links) und σ_{Hmax} (rechts) berechnet;

oben: Einfluss der Profil-Formabweichung f_{fa} von 0 bis 21 μm (Qualität 6); unten: Flankenlinien-Formabweichung f_{fb} von 0 bis 23 μm



oder die Drehmomentkapazität kann über die Stelle mit der größten Pressung bestimmt werden.

Für jede Eingriffsposition lässt sich die Verlustleistung berechnen, und davon wiederum kann der Gesamtverlust und der Wirkungsgrad der Verzahnung abgeleitet werden. Daneben werden an jedem Punkt der Verzahnungsoberfläche weitere Phänomene berechnet, wie beispielsweise Graufleckigkeit, Fressen oder Verschleiß.

In dieser Studie haben wir uns darauf beschränkt, die Abhängigkeit des Drehwegfehlers und der maximalen Hertzschen Pressung σ_{Hmax} für verschiedene Herstellabweichungen zu untersuchen. Die Resultate werden direkt in zwei Grafiken im Skript dargestellt (**Bild 04**), alle übrigen Ergebnisse werden in einer CSV-Datei für die weitere Analyse in Excel gespeichert.

Die Grafiken zeigen den Drehwegfehler und die entsprechende Hertzsche Pressung in Abhängigkeit der Profil-Formabweichung f_{fa} . Die Formabweichung entspricht der Doppelamplitude der Welle in Profilrichtung, wodurch die Herstellabweichung simuliert wird (**Bild 04**). Für jede Doppelamplitude werden 16 Wellenvarianten mit je 4 verschiedenen Längen und Starts der Welle berechnet (siehe Faktor 1 und Faktor 2 in **Bild 03**). Dies simuliert die mögliche Streuung der Abweichungen. Die Resultate sind in den Grafiken als blaue Punkte, der Mittelwert als rote Linie und das 97,5-%-Perzentil-Intervall als zwei schwarze Linien dargestellt.

Mit dieser Methode lässt sich der Einfluss der Profilabweichungen analysieren. Dieselbe Vorgehensweise wird auch für die Simulation der Flankenlinien-Formabweichung f_{fb} wiederholt, sodass eine Unterscheidung zwischen den Auswirkungen von Profil- und Flankenlinienabweichungen möglich ist.

GETRIEBEANWENDUNGEN

Zahnräder und Getriebe kommen heute in vielen Bereichen zum Einsatz, die Zahl der Anwendungen nimmt weltweit sogar stetig zu. Am häufigsten werden Stirnräder verwendet, welche es in zahllosen Auslegungsvarianten gibt: gerad- oder schrägverzahnt, mit niedriger, normaler oder hoher Überdeckung, mit vielen, wenigen oder gar keinen Profil- und Flankenlinienmodifikationen, aus Metall oder Kunststoff etc. In der Regel hängt die Bauart vom konkreten Anwendungsfeld ab. In Getrieben von EV-Fahrzeugen werden zum Beispiel üblicherweise Schrägstirnräder mit hoher Überdeckung und spezifischen Modifikationen eingesetzt. Bei Industriegetrieben überwiegen Schrägstirnräder mit normalen Bezugsprofilen (nach ISO 53 [7]) und eventuell Breitenballigkeit.

Da je nach Anwendung unterschiedliche Getriebetypen zum Einsatz kommen, interessiert die Frage, wie empfindlich ein bestimmter Getriebetyp auf Herstellabweichungen reagiert. Deshalb folgt in diesem Abschnitt eine Betrachtung verschiedener Anwendungen, nämlich EV-, Industrie-, Windkraft-, Militär- und kleine Kunststoffgetriebe.

INDUSTRIEGETRIEBE

Industriegetriebe verwenden meistens Schrägstirnräder, ausgelegt auf hohe Drehmomentkapazitäten mit Standardbezugsprofilen (nach ISO 53 [7] oder ähnlich). Die Zahnräder bestehen aus einsatzgehärtetem Stahl, sind in Qualität 5–6 geschliffen und haben keine ausgeprägten Profil- und Flankenlinienmodifikationen. **Bild 04** zeigt eine Verzahnung ohne Modifikationen. Der Anstieg des Drehwegfehlers auf Grund von Formabweichungen

ist bis Qualitätsstufe 6 akzeptabel, allerdings kann die Hertzsche Pressung σ_{Hmax} aufgrund der Profil-Formabweichung f_{fa} erheblich zunehmen. Verglichen mit Profilabweichungen wirken sich Flankenlinienabweichungen auf die Zunahme des Drehwegfehlers annähernd gleich aus, auf σ_{Hmax} dagegen weniger stark.

In **Bild 05** sind die Resultate für eine große Verzahnung ($m_n = 20$ mm) mit passenden Flankenlinienmodifikationen dargestellt. Der Drehwegfehler ist auch ohne Herstellabweichungen sehr hoch, dementsprechend fällt die durch f_{fa} oder f_{fp} bedingte Zunahme gering aus. Interessanterweise ist auch der Einfluss von Herstellabweichungen (f_{fa} oder f_{fp}) auf σ_{Hmax} in diesem Fall äußerst gering.

Für die Auslegung von Industriegetrieben lässt sich daraus folgender Schluss ziehen: Herstellabweichungen haben bis Qualität 6 nur geringen bzw. akzeptablen Einfluss auf den Drehwegfehler (der mittlere Drehwegfehler-Anstieg beträgt 5 %, im ungünstigsten Fall 60 %), der Anstieg von σ_{Hmax} kann im ungünstigsten Fall signifikant sein und damit die Lebensdauer verkürzen. Eine gut dimensionierte Flankenlinienmodifikation (Balligkeit) ist daher sinnvoll.

Bei Militärgetrieben zeigte sich in der Analyse ein ähnliches Verhalten wie bei Industriegetrieben. Die Geräuschentwicklung ist hier nebensächlich, im Mittelpunkt steht eindeutig die Lastverteilung.

ELEKTROFAHRZEUGE

Getriebe für Elektrofahrzeuge (EV-Getriebe) weisen üblicherweise hohe Profilüberdeckungen (HCR), hohe Schrägungswinkel und bedeutende Profil- und Flankenlinienmodifikationen auf. Eine Profilüberdeckung $\epsilon_a > 2$ in Kombination mit einer hohen Sprungüberdeckung ϵ_p ergibt damit ein gutes Geräuschverhalten dank dem sehr niedrigen Drehwegfehler des Zahnrad designs.

Da der ursprüngliche Drehwegfehler ohne Abweichungen gering ist, wirken sich Herstellabweichungen stärker aus als bei Zahnradern ohne hohe Überdeckung. Dennoch ist der Einfluss geringer als erwartet, der mittlere Drehwegfehler steigt um lediglich 10 %. Berücksichtigt man den ungünstigsten Fall, der im oberen Bereich der 97,5-%-Perzentile auftreten kann, beträgt der Anstieg ungefähr 50 % (bei Qualität 5). Für die Praxis ist hier Qualitätsstufe 5 ausreichend. Im Interesse einer besseren Vergleichbarkeit mit den anderen Fällen wurden Berechnungen bis Qualität 6 durchgeführt.

WINDKRAFT-GETRIEBE

Die Analyse umfasste verschiedene reale Zahnrad auslegungen in Getrieben unterschiedlicher Windkraftanlagen. Zum Einsatz kommen meistens Zahnrad er mit normalem Zahnprofil (HCR-Zahnrad er sind anfällig für Graufleckigkeit), hohen Schrägungswinkeln und günstigen Profil- und Flankenlinienabweichungen. Beim Verhalten hinsichtlich Herstellabweichungen zeigten sich ähnliche Tendenzen wie im Abschnitt zu Industriegetrieben besprochen.

KLEINE GETRIEBE MIT KUNSTSTOFF-ZAHNRÄDERN

Im Spritzgussverfahren hergestellte Zahnrad er können normalerweise nur Qualität 10 (ISO 1328), bestenfalls 9, erreichen, weshalb die zugelassenen Herstellabweichungen rund 4-mal höher sind als bei geschliffenen Zahnrad ern der Qualitätsstufe 6. Profil-Formabweichungen f_{fa} wirken sich dementsprechend stark auf den Drehwegfehler aus. Das NVH-Verhalten ist dennoch wenig betroffen, da Kunststoffe hohe Dämpfungseigenschaften aufweisen.

Der Einfluss von Flankenlinienabweichungen auf den Drehwegfehler und auf σ_{Hmax} ist gering (im Vergleich zu Stahlzahnrad ern), weil der Elastizitätsmodul sehr niedrig ist und sich damit durch die hohe Biegsamkeit der Zähne eine gute Anpassungsfähigkeit der Verzahnung ergibt.

FAZIT

Vorgestellt wird eine Methode, mit der der mögliche Einfluss von Herstellabweichungen auf die NVH-Performance in Abhängigkeit von einer vorgeschriebenen Verzahnungsqualität statistisch ausgewertet werden kann. Dazu wird eine bestimmte Zahnrad auslegung mit einer Profil-Formabweichung f_{fa} von 0 bis zu einem der Qualität 6 (oder einer anderen Qualität) entsprechenden Wert untersucht. Die Resultate werden grafisch dargestellt, mit dem Drehwegfehler und der Hertzschen Pressung σ_{Hmax} als Funktion von f_{fa} . Dieselbe Vorgehensweise lässt sich auf die Flankenlinien-Formabweichung f_{fp} anwenden. Die Methode erleichtert die Bestimmung einer geeigneten Zahnradqualität, damit sich die NVH- und/oder Spannungseigenschaften durch Herstellabweichungen nicht zu stark verschlechtern.

Mit dieser Methode wurden verschiedene Typen von Zahnrad Designs untersucht, wie sie üblicherweise in EV-, Industrie-, Windkraft-, Militär- und kleinen Kunststoffgetrieben zum Einsatz kommen. Die erörterten Ergebnisse zeigen: Je nach Zahnradtyp variieren die Auswirkungen von Herstellabweichungen – bei gleicher Qualitätsvorgabe – beträchtlich. Dieses Wissen erleichtert die Entscheidung, welche Zahnradqualität vorgeschrieben werden sollte.

Dieser Aufsatz ist in ähnlicher Form zuerst in englischer Sprache erschienen: Kissling, U. (2023): Impact of manufacturing deviations on the NVH behavior of modern gear design concepts. – VDI-Bericht 2422: 367-382, International Conference on Gears, 13.-15. Sept. Garching, VDI-Wissensforum GmbH (Hrsg.), VDI Verlag: Düsseldorf.

Literaturverzeichnis

- [1] Kissling, U.: Taking into Account the Production Methodology and Estimating the Influence of Manufacturing Quality on NVH Performance when Sizing Gears; Gear Technology, Sep./Okt. 2022.
- [2] KISSsoft und KISSdesign: www.kisssoft.ag.
- [3] Radev, S.: Einfluss von Flankenkorrekturen auf das Anregungsverhalten gerad- und schrägverzahnter Stirnradpaarungen. Dissertation, Technische Universität München. 2006.
- [4] Sundar, S.; Singh, R.; Jayasankaran, K.; Ohio State University: Effect of the Tooth Surface Waviness on the Dynamics and Structure-Borne Noise of a Spur Gear Pair. SAE International Journal of Passenger Cars. 2013.
- [5] Malburg, M.; Zecchino, M.: Understanding and Controlling the Source of Gear Noise. Gear Technology, August 2021.
- [6] Heider, M. K.: Schwingungsverhalten von Zahnradgetrieben. Dissertation, Technische Universität München. 2012.
- [7] ISO 53, Stirnräder für den allgemeinen und Schwermaschinenbau – Standard-Bezugszahnstangen – Zahnprofile, 1998.
- [8] ISO 1328-1, Zylinderräder – ISO-Toleranzsystem, 2013.

Bilder: Kisssoft

www.kisssoft.com

DER AUTOR

Dr. Ulrich Kissling,
Präsident und Gründer,
KISSsoft AG, Bubikon (CH)