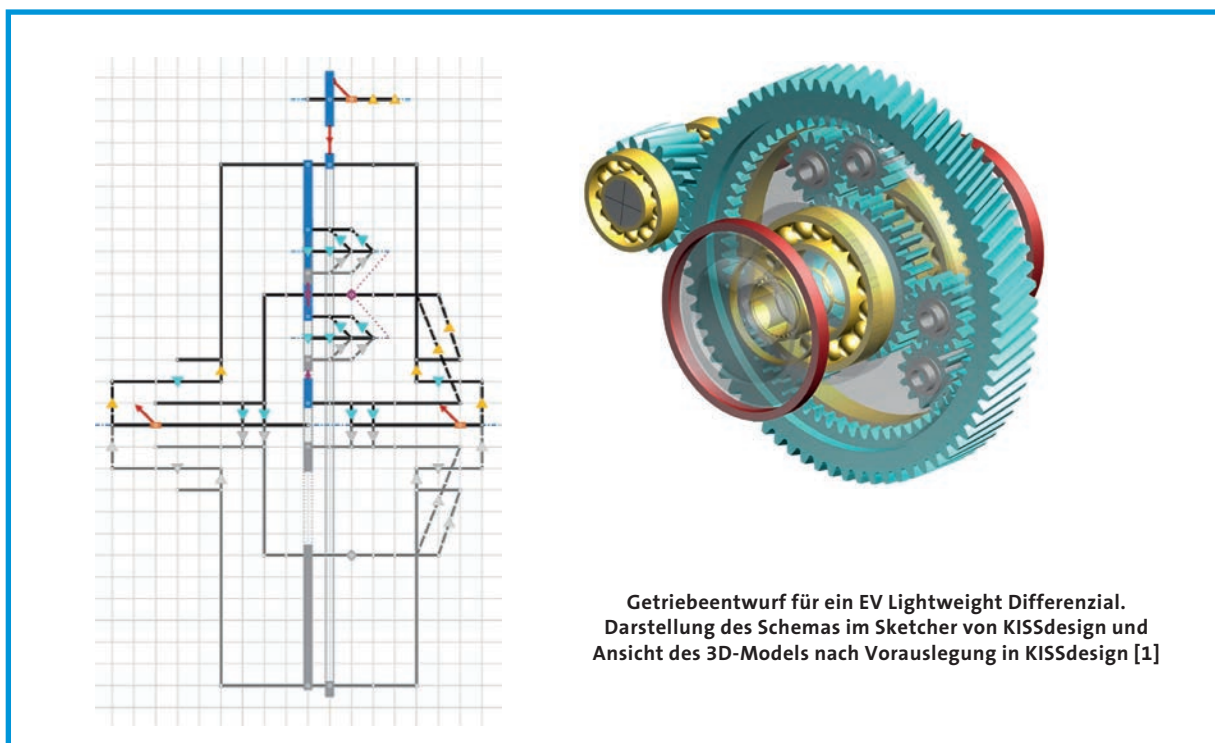


EINFLÜSSE AUF DIE NVH-PERFORMANCE BEI DER ZAHNRADAUSLEGUNG – TEIL 2

Die Geräusch-Emissionen von Zahnradgetrieben bei Elektrofahrzeugen sind ein großes Problem. Durch eine hohe Genauigkeit der verwendeten Zahnräder lässt sich bekanntlich sowohl die Lebensdauer erhöhen als auch die Vibrationsanregung, die sogenannte NVH (Noise-Vibration-Harshness)-Performance, und damit das Geräusch verbessern. Viele EV-Hersteller schreiben deshalb für die Herstellung der Zahnräder eine hohe bis sehr hohe Qualität nach ISO 1328 vor.



Getriebeentwurf für ein EV Lightweight Differential.
Darstellung des Schemas im Sketcher von KISSdesign und
Ansicht des 3D-Modells nach Vorauslegung in KISSdesign [1]

2 DER EINFLUSS DER HERSTELLQUALITÄT AUF DIE NVH-PERFORMANCE

2.1 PROBLEMSTELLUNG

Wie zuvor besprochen kann die Fertigung von vorgegebenen Modifikationen, insbesondere von topologischen Modifikationen, schwierig sein. Der Konstrukteur wünscht natürlich, dass seine – z. B. speziell für vibrationsarme Zahnradauslegungen im EV-Bereich vorgegebenen – Modifikationen möglichst formgenau eingehalten werden, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen.

In der Praxis wird insbesondere die Profil-Formabweichung 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 die geforderte hohe Qualität überhaupt noch wesentliche Verbesserungen bringt, oder ob beispielsweise eine gut ausgelegte Profilmodifikation nicht mehr Wirkung zeigt als die reine Reduktion der zugelassenen Herstellabweichungen.

Die Auswertung der Profil- und Flankenlinien bei Zahnradmessungen zeigt immer eine Streuung des Signals, welchem meistens eine gewissen Grund-Welligkeit überlagert ist. Die Größe der Welligkeit beeinflusst somit direkt die resultierende Profil- und Flankenlinien-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 Geräusch-

verhaltens ergeben. Am FZG der TU München wurden entsprechende Versuche gemacht und nachgewiesen, dass mit einer genau vorgegebenen Welligkeit eine deutliche Geräuschverbesserung erzielt werden kann [6, 7].

Hiervon ausgehend ist die Idee entstanden, auf eine theoretisch optimal ausgelegt 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 mit Kontaktanalyse (unter Last) untersucht werden auf die üblichen wichtigen Eigenschaften wie Drehwegabweichung, Kraftanregung, Hertztsche Pressung, Verlust etc. 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_{fo} für das Profil, bzw. f_{fo} für die Flankenlinie) gemäß der vorgesehenen Verzahnungsqualität (z. B. nach ISO 1328) entsprechen.

2.2 ANWENDUNG IN DER BERECHNUNG

Um diese Berechnung durchzuführen, wurde in KISSsoft [1] im Tab ‚Herstellung‘ für den Anwender eine Tabelle eingeführt, in welcher Herstellabweichungen definiert werden können.

Die fertigungsabhängige Abweichung der Flanke kann entsprechend der **Tabelle** simuliert werden, als Welligkeit nur in Profilrichtung, nur in Flankenrichtung oder in Bearbeitungsrichtung. Eingaben können auch kumuliert werden durch Mehrfacheingaben von Abweichungen.

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 (**Bild 04**) sowie die Amplitude wird variieren nach dem Zufallsprinzip. 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.

Wenn dieses Vorgehen Schritt für Schritt mit manuellen Berechnungen durchgeführt werden muss, dann wird es extrem zeitaufwändig. Der Einsatz der in KISSsoft [1] eingebauten Skript-Sprache ist hier eine gute 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.

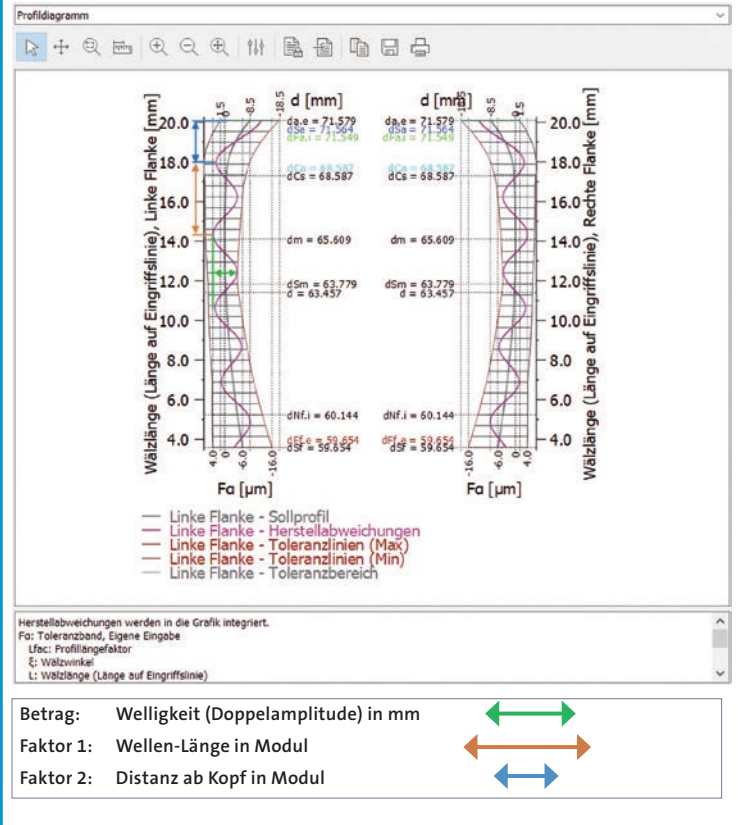
2.3 ANWENDUNG BEI EINEM INDUSTRIEGETRIEBE

2.3.1 PROFIL-FORMABWEICHUNGEN

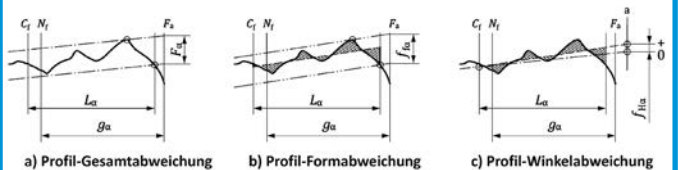
Als erstes Beispiel wird die Methode an einem Industriegetriebe ohne Modifikationen eingesetzt. Die betrachtete Abtriebsstufe hat Modul 6 mm, Zähnezahzahl 26:75, Zahnbreite 26 mm und 5000 Nm Abtriebsdrehmoment. Die vorgeschriebene Qualität für die einsatzgehärteten Räder nach ISO 1328 ist 6; die zulässige Profil-Formabweichung f_{fo} (**Bild 05**) beträgt 12 μm .

Berechnet wird der Drehwegfehler (PPTE) bei unterschiedlichen Herstell-Welligkeiten. Die Doppel-Amplitude (Spitze-Tal-Wert) wird von 0 bis 12 μm variiert. Eine Doppel-Amplitude von 2*6 μm entspricht der maximal zulässigen Profil-Formabweichung (12 μm) bei Qualität 6. Bei vorgeschriebener Qualität 3, 4

04 Darstellung der Welligkeit im Profildigramm



05 Profilabweichungen nach ISO 1328-1 [8]

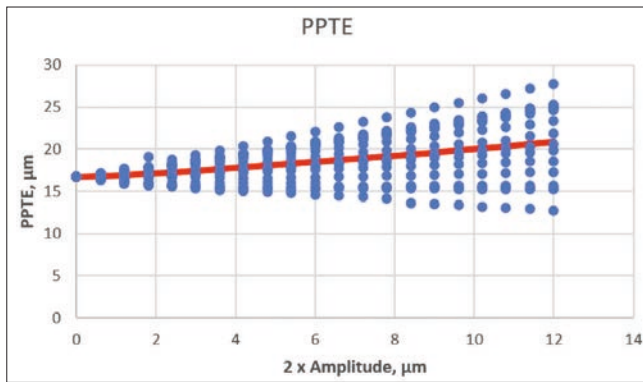


oder 5 wären es Doppel-Amplituden von 2.1, 3.0 oder 4.3 μm . **Bild 06** zeigt das Resultat, wenn die Doppel-Amplitude von 0 bis 12 mm, die Länge von 3 bis 9 mm und die Distanz ab Kopf mit 0, 25, 50 und 75 % der Wellenlänge variiert wird. In der Grafik werden alle PPTE-Ergebnisse mit gleicher Amplitude über der gleichen Abszisse aufgetragen; damit wird die Bandbreite der Ergebnisse in Abhängigkeit der Länge und des Startwinkels dargestellt. Bei entsprechender Amplitude wird der PPTE folglich innerhalb des dargestellten Intervalls liegen.

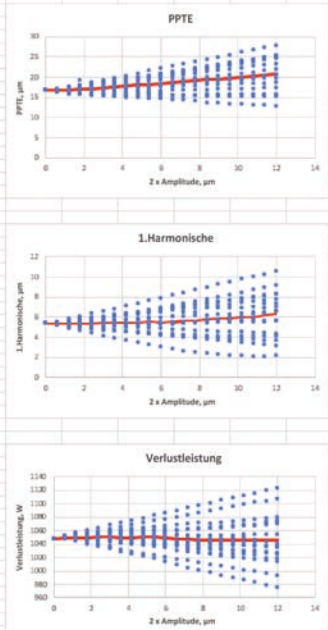
Der PPTE der fehlerfreien Verzahnung beträgt 16.7 μm . Bei einer Toleranz Q4 nimmt der PPTE im Mittel um 11 % zu, und liegt innerhalb eines Bereichs von 15.2 - 22.0 μm . Bei Q6 ist die Zunahme im Mittel 21 %, innerhalb 12.8 - 27.7 μm . Bedenkt man, dass durch eine angepasste Profilmodifikation der PPTE um 50 und mehr Prozent gesenkt wird, ist eine Erhöhung von 21 % durchaus annehmbar. Die Vorgabe Q6 für diese Verzahnung ist folglich in Ordnung, die Herstellkosten für Q6, gegenüber Q4, sind deutlich günstiger.

Bei der Verlustleistung ist die Zunahme unbedeutend, im Mittel ergibt sich eine Abnahme von 1 %. Bei der Belastung hingegen ist der Einfluss größer, die maximale Hertztsche Pressung erhöht sich bei Q6 im Mittel um 11 % (**Bild 07**).

06 Einfluss der Herstell-Welligkeit (Profil) auf den Drehwegfehler (PPTE) bei einem Zahnradpaar Modul 6 mm (Rote Linie: Mittelwert)



Sinus-Ordolation	2' Amplitude	Length	#/a	Start angle	PPTE	1.Ham.	Loss	sigma	Load/Var.	2.Ham.
0	6	0	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	6	90	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	6	180	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	6	270	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	12	0	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	12	90	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	12	180	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	12	270	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	18	0	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	18	90	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	18	180	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	18	270	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	24	0	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	24	90	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	24	180	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0	24	270	180	16.705	5.38	1048.21	949.02	1450.82	5.38	5.38
0.6	6	0	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	6	90	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	6	180	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	6	270	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	12	0	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	12	90	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	12	180	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	12	270	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	18	0	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	18	90	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	18	180	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	18	270	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	24	0	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	24	90	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	24	180	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	24	270	180	16.828	5.32	1048.06	947.75	1454.85	5.32	5.32
0.6	6	0	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	6	90	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	6	180	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	6	270	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	12	0	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	12	90	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	12	180	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	12	270	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	18	0	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	18	90	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	18	180	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	18	270	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	24	0	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	24	90	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	24	180	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
0.6	24	270	180	17.093	5.45	1052.62	947.79	1458.03	5.45	5.45
1.8	6	0	180	17.330	5.59	1056.47	952.32	1456.32	5.59	5.59



bei Q6 im Bereich von +10 % bis +100 % (Bild 09).

2.4 ANWENDUNG BEI EV-GETRIEBEN

Während Getriebe für industrielle Anwendungen meist keine oder einfachere Modifikationen aufweisen, werden bei Fahrzeuggetrieben generell, und bei EV-Getrieben im Speziellen, immer komplexe Modifikationen verwendet, um die Lastverteilung, das Geräuschverhalten und den Verlust/Wirkungsgrad zu optimieren. Solche Zahnradpaare haben meist einen viel kleineren Drehwegfehler als konventionelle Getriebe. Die Untersuchung, wie sich Herstellfehler bei Rädern mit markanten Modifikationen auswirken, ist deshalb notwendig und kann ganz andere Resultate ergeben.

Das besprochene Beispiel ist die Zwischenstufe eines EV-Getriebes aus einem PKW einer bekannten Marke. Die Zahnradpaarung hat Modul 1.57 mm, Zähnezah 33:87, Zahnbreite 35 mm, Schrägungswinkel 23.5° und 500 Nm Antriebsdrehmoment. Die vorgeschriebene Qualität für die einsatzgehärteten Räder nach ISO 1328 ist 5; die Profil-Formabweichung f_{α} beträgt 6 µm.

Der Drehwegfehler (PPTE) der fehlerfreien Verzahnung beträgt 0.71 µm, ohne Modifikationen wäre er 1.7 µm. Dies zeigt, wie wichtig der Einfluss der Modifikationen ist. Die Auswertung zeigt in diesem Beispiel, dass eine Welligkeit im Mittelwert sehr wenig Einfluss (Zunahme von 10 % bei Qualität 5) auf den PPTE hat. Die Streuung des PPTE – je nach Länge der Welle oder der Lage der ersten Amplitude – nimmt aber deutlicher zu bei größeren Amplituden als beim Beispiel in Kapitel 2.3. Bei einer Toleranz von 6 µm (Qualität 5) kann sich der PPTE um +50 % (im schlechtesten Fall) oder -28 % (Bestfall) verändern. Dies ist nicht unerwartet, Verzahnungen mit großen Modifikationen sind oft weniger tolerant bezüglich Herstellfehler.

2.3.2 FLANKENLINIEN-FORMABWEICHUNGEN

Die vorgeschriebene Flankenlinien-Formabweichung des betrachteten Rades f_{α} beträgt 11 µm für Q6 bei Zahnbreite 44 mm. Bild 08 zeigt das Resultat, wenn eine Welligkeit in Flankenrichtung angebracht wird mit Variation der Amplituden von 0 bis 11 mm, der Längen von 7.5 bis 22 mm und der Distanz ab Kopf mit 0, 25, 50 und 75 % der Wellenlänge.

Der Einfluss einer Flankenlinien-Welligkeit auf den Drehwegfehler ist äußerst gering (bei Q6 vergrößert sich der PPTE im Mittel um etwa 0.2 %)! Auch bei der Verlustleistung ist die Zunahme minimal (< 0.3 % bei Q6); bei der Belastung ist der Einfluss größer, die maximale Hertzische Pressung vergrößert sich bei Q6 um gemittelt etwa 14 % (im Bereich von +11 bis +16 %. Flankenlinien-Formabweichungen durch Welligkeit sind offensichtlich deutlich unkritischer als Profil-Formabweichung!

2.3.3 WELLGKEIT IN BEARBEITUNGSRICHTUNG

Eine Welligkeit in Bearbeitungsrichtung kann beispielsweise durch den Fräsprozess entstehen. Der Einfluss auf den Drehwegfehler PPTE durch die Welligkeit ist ähnlich wie bei der Welligkeit in Profilrichtung und ergibt bei Q6 eine maximale Zunahme von 25 %. Die maximale Hertzische Pressung verändert sich

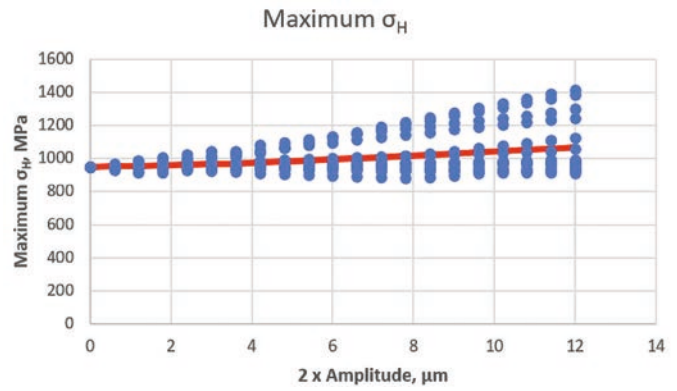
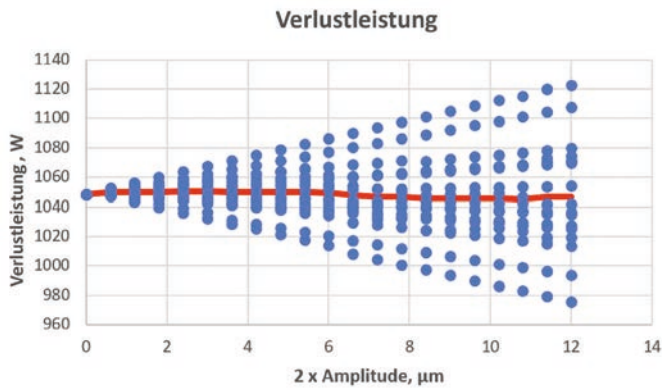
Natürlich kann die hier beschriebene Methode auch eingesetzt werden, um möglichst 'tolerante' Modifikationen zu bestimmen!

Der Einfluss der Herstellabweichungen auf den Wirkungsgrad (Verlust) ist recht gering. Verglichen mit dem Wert der fehlerfreien Verzahnung verändert sich der Verlust bei Q5 (Doppel-Amplitude 6.0 µm) nur im Bereich von +-6 %. Hingegen ist, auch erwartungsgemäß, der Einfluss der Herstellabweichungen bei der auftretenden Belastung des Zahns deutlich größer. Die maximale Hertzische Pressung vergrößert sich bei Q5 im Mittel um 38 % Bereich von -9 % bis +67 %.

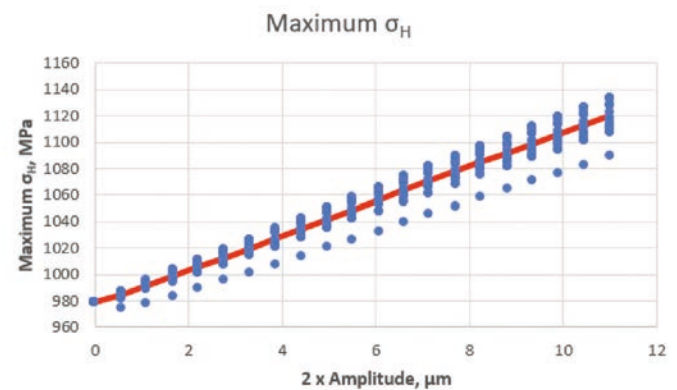
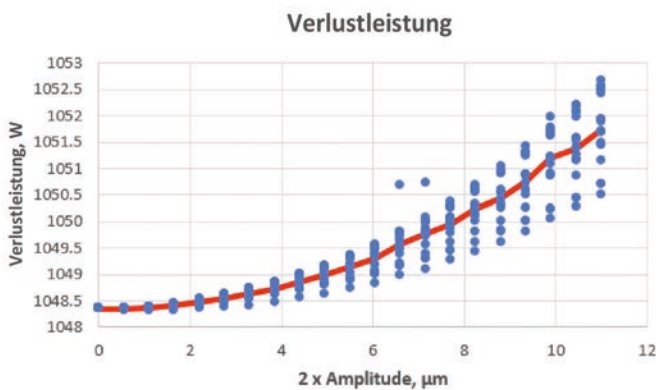
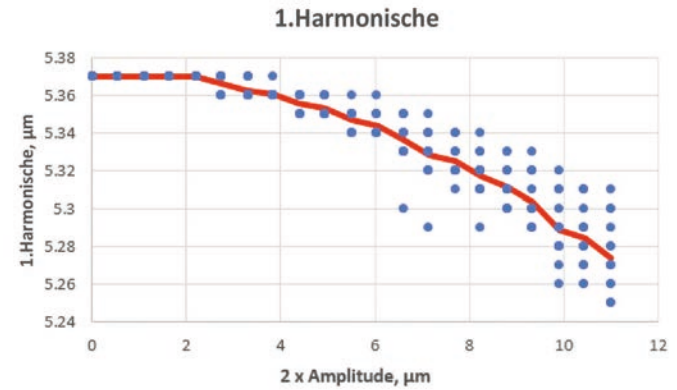
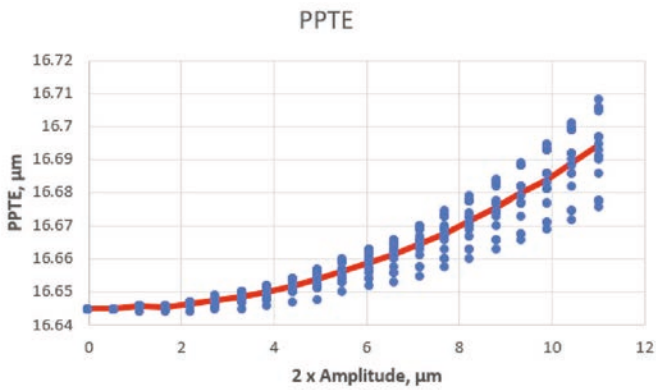
2.5 EINBEZUG VON WINKELABWEICHUNGEN, SIMULATION VON GESAMTABWEICHUNGEN

Bisher wurde der Einfluss von Formabweichungen am Profil (f_{α}) und von Formabweichungen an der Flankenlinie (f_{β}) durch Welligkeit besprochen. Herstellabweichungen der Zahnflanke bestehen aber aus Form- und Winkelabweichungen ($f_{H\alpha}$, $f_{H\beta}$), welche zusammen dann die Gesamtabweichung (F_{α} , F_{β}) ergeben (Bild 05). Als zusätzlicher Parameter wird nun auch noch die Winkelabweichung kreuzvariirt. Dies erhöht zwar den Rechenaufwand, verallgemeinert aber die Methode.

07 Einfluss der Herstell-Welligkeit (Profil) auf die Verlustleistung (links) und die maximale Herztsche Pressung (rechts)



08 Einfluss der Herstell-Welligkeit (Flanke) auf den Drehwegfehler (PPTE) und die Amplitude der ersten Harmonischen (FFT-Zerlegung) bei einem Zahnradpaar Modul 6 mm. Unten: Einfluss auf die Verlustleistung (links) und die maximale Herztsche Pressung (rechts)

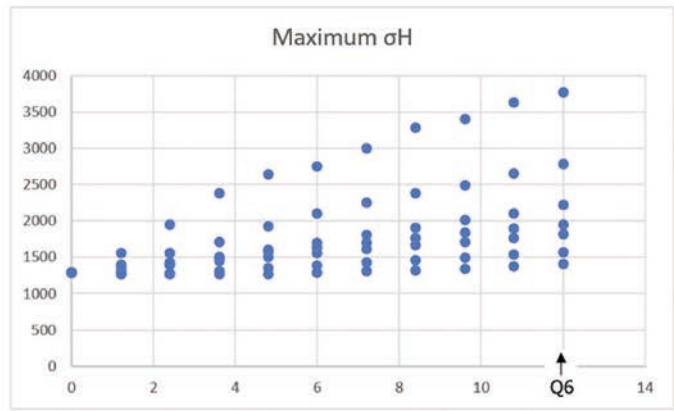
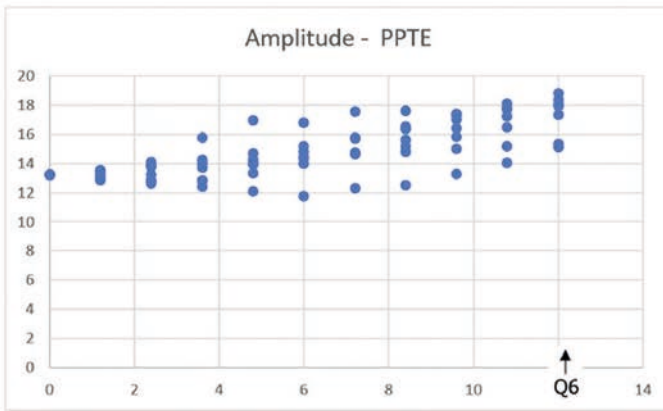
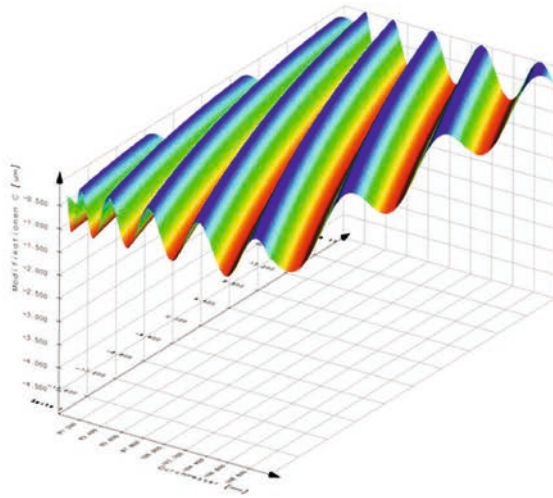


Beim besprochenen Beispiel beträgt die Profilwinkeltoleranz bei Q6 +/- 9.5 µm; die Formtoleranz 12.0 µm (Amplitude 6.0 µm). Der in **Bild 10** dargestellte Bereich zeigt den Verlauf von Q4 bis zu Q6. Die Auswertung zeigt, dass die Winkelabweichung einen geringeren Einfluss auf die Drehwegabweichung hat als die Formabweichung. **Bild 11** zeigt die gleichen Ergebnisse in einer andern Darstellungsart. Hier wird der bis Q6 zulässige Toleranzbereich dargestellt. Sowohl beim PPTE wie bei der maximalen Pressung ist der geringere Einfluss der Winkelabweichung deutlich sichtbar.

3 ZUSAMMENFASSUNG

Durch gut ausgelegte Modifikationen an der Zahnflanke lässt sich sowohl die Lebensdauer erhöhen als auch die Vibrationsanregung und damit das Geräusch verbessern. Um die gewünschten Eigenschaften für jeden Betriebspunkt des Getriebes zu erreichen, müssen die Modifikationen möglichst genau erreicht werden. In der Praxis wird deshalb insbesondere die Formabweichung sehr stark eingeschränkt. Teilweise werden hier Vorgaben gemacht, welche fast nicht mehr herstellbar sind, und demen-

09 Einfluss der Doppelamplitude der Herstell-Welligkeit in Bearbeitungsrichtung (oben, links) auf den Drehwegfehler (PSTE, unten, links) und die maximale Herztsche Pressung (unten, rechts)



sprechend die Zykluszeit und damit die Herstellkosten wesentlich erhöhen.

Um den Einfluss der Herstellabweichungen zu beurteilen, wird auf die theoretisch ideale Zahnflanke eine sinusförmige Welligkeit aufgebracht. Die Welligkeit kann mit den Parametern Amplitude, Länge und Anfangswert modifiziert werden. Diese Herstellabweichung kann sowohl in Profil- als in Breitenrichtung, in Bearbeitungsrichtung oder kombiniert ausgeführt werden. Durch eine systematische Variation dieser Parameter kann untersucht werden wie stark und in welchem Bereich sich die gewünschten Eigenschaften der Verzahnung wie Drehwegfehler,

Kraftanregung, Wirkungsgrad oder maximale Herztsche Pressung verändern.

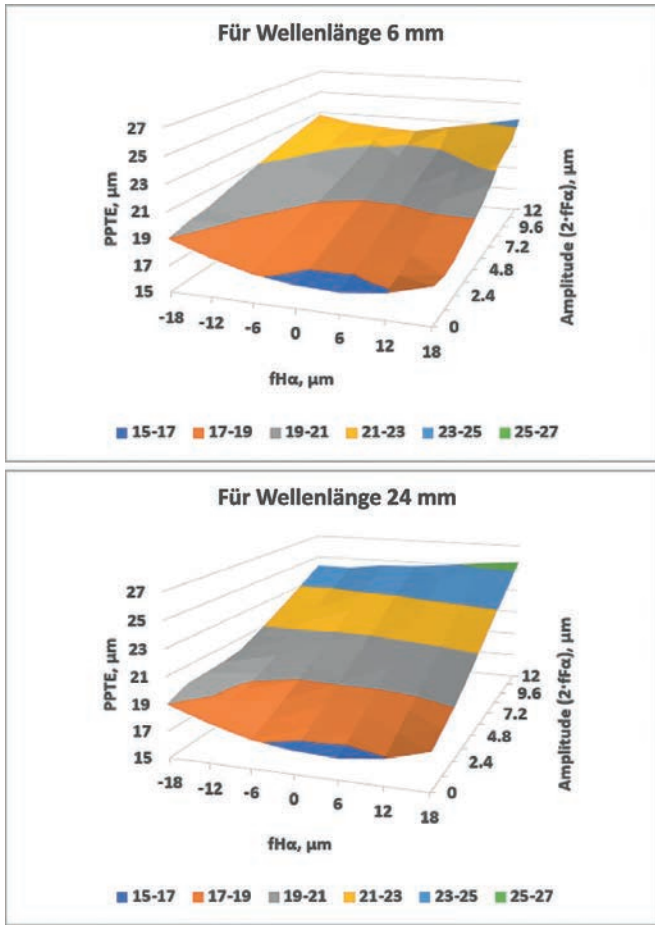
Entspricht beispielsweise die Doppel-Amplitude der Welligkeit auf dem Profil ungefähr der Toleranz der Profil-Formabweichung ($f_{f\alpha}$) nach ISO 1328 bei der vorgegebenen Qualität X, kann bestimmt werden, wie „stabil“ die Verzahnung bezüglich Herstellfehler ist. Entsprechend kann dann die Anforderung an die Qualität auf X-1 erhöht oder auf X+1 verringert werden; womit sich dann auch die Herstellkosten verändern.

Nebst Formabweichungen können auch Winkelabweichungen und Gesamtabweichungen untersucht werden. Winkelabweichungen

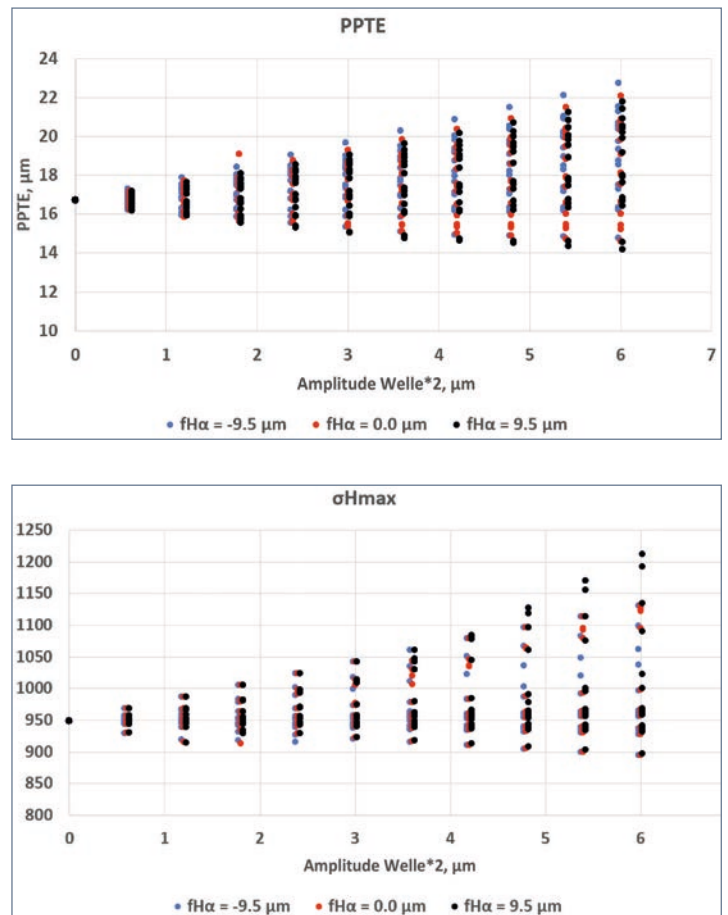
Tabelle: Definition der Welligkeit

Eingaben ,Betrag', µm	Formfehler $f_{f\alpha}$ Simulation Amplitude *2	Formfehler $f_{f\beta}$ Simulation Amplitude *2	Welligkeit bei Herstellung Amplitude *2
,Factor 1'	Länge der Sinus-Welle in Modul (Wälzlänge)	Länge der Sinus-Welle in Modul	Länge der Sinus-Welle in Modul
,Factor 2'	Distanz Kopf bis Mitte Amplitude in Modul (Startpunkt)	Distanz Seite I bis Mitte Amplitude in Modul (Startpunkt)	Schrägungswinkel der Welligkeit β_{well}
Verwendete Formel	1)	2)	3)
1)	$\Delta f_{\alpha} = \text{Betrag} / 2 * [1 - \sin(2 * \pi * (0.25 - \text{Factor}2 / \text{Factor}1 + L(y) / \text{Factor}1 / mn))]$		
2)	$\Delta f_{\beta} = \text{Betrag} / 2 * [1 - \sin(2 * \pi * (0.25 - \text{Factor}2 / \text{Factor}1 + b(x) / \text{Factor}1 / mn))]$		
3)	$\Delta f_{\alpha}, \Delta f_{\beta}$ in Abhängigkeit von β_{well}		

10 Einfluss von Profilwinkelabweichungen fH kombiniert mit Profilformabweichungen ff durch Welligkeit auf den Drehwegfehler (PPTe). Oben: Kurze Wellenlänge 6 mm, unten: Lange Wellenlänge 24 mm



11 Andere Darstellung der Ergebnisse. Die Profilwinkelabweichungen fH wird nur in 3 Varianten (-9.5, 0, +9.5 μm) variiert und farblich markiert. Oben: Darstellung des Drehwegfehlers (PPTe) wie in Bild 10, Unten: Maximale Hertzsche Pressung



chungen – im Bereich der vorgegeben Qualität – haben einen eher geringeren Einfluss auf die Verzahnungseigenschaften.

Zwei Beispiele aus der Praxis werden beschrieben, eine Applikation von einem Industriegetriebe und eine von einem EV-Fahrzeug. Die Analyse zeigt, dass Verzahnungen mit gut ausgelegten Modifikationen, die damit bereits einen tiefen PPTe-Wert aufweisen, empfindlicher auf Herstellabweichungen reagieren. Die Analyse zeigt deutlich, dass eine Vorschrift für eine Genauigkeit, welche besser ist als Q4, keinen Sinn macht. Die Veränderungen der Eigenschaften des Zahneingriffs sind dann so minim, dass der Mehraufwand nicht gerechtfertigt ist.

Die Verlustleistung wird durch Herstellabweichungen in Profilrichtung nur minim beeinflusst, Drehwegfehler PPTe und maximale Hertzsche Pressung sind hingegen deutlich abhängig von Abweichungen. Der Drehwegfehler kann sich sogar verbessern bei gewissen Welligkeiten, dies bestätigen Untersuchungen am FZG in München. Flankenlinien-Formabweichungen durch Welligkeit sind deutlich unkritischer als Profil-Formabweichungen. Die Erweiterung der Untersuchung auf Formabweichungen in

Kombination mit Winkelabweichungen – also auf Gesamtabweichungen – zeigt, dass Winkelabweichungen einen geringeren Einfluss auf die Performance haben.

Die Methodik kann auch eingesetzt werden, um unterschiedliche Modifikations-Varianten zu prüfen und zu evaluieren, und zu prüfen wie tolerant die Auslegung der Zähne auf Herstellfehler ist.

Bilder: KISSsoft AG

www.kisssoft.com

Literaturverzeichnis:

[1] KISSsoft & KISSdesign: www.kisssoft.ag
 [2] Gleason Corporation: www.gleason.com/de
 [3] Müller, H.: Fertigungssimulation als Basis für Industrie 4.0, Schweizer Maschinenelemente Kolloquium, 2018
 [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 TU München. 2012
 [7] Radev, S.: Einfluss von Flankenkorrekturen auf das Anregungsverhalten gerad- und schrägverzählter Stirnradpaarungen. Dissertation TU München. 2006
 [8] ISO 1328-1; Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification – Part 1, 2013. (Identisch mit ISO DIN 1328-1.)

DER AUTOR

Ulrich Kissling,
 Dr. Ing. ETH, KISSsoft AG,
 Bubikon, Schweiz