

Modifikation der Zahnradverbindungen in der Fahrzeugindustrie

*Debreczeni Dániel MSc, PhD Student, Institut für Maschinen- und
Produktplanung an Universität Miskolc,
Dr. Kamondi László PhD, Institut für Maschinen- und Produktplanung
an Universität Miskolc*

INHALT

In diesem Artikel wird die Entwicklung von Zahnradern in der modernen Fahrzeugindustrie durch die Bestimmung der gewünschten Modifikationen ermittelt. Die wichtigsten Voraussetzungen für die Festlegung der Mikrogeometrie werden erörtert. Der Artikel bietet einen Einblick in das Thema des praxisnahen Aufbaus der Geometrie und die charakteristischen Typen der verschiedenen Korrekturen werden vorgestellt. Nach einem Überblick der verschiedenen Möglichkeiten werden die zur Auswertung der festgestellten Geometrie benötigten wichtigsten Testen erläutert.

Das Ziel des Artikels ist die Darstellung der möglichen Komplexität der Auslegung der Mikrogeometrie und die Beschreibung der Schwierigkeiten bei der Auswahl der optimalen Variante. Wegen dieser Komplexität und der Sensitivität des Verhaltens des Gesamtsystems stellt die genaue Bestimmung der Modifikationen eine der vielseitigsten Aufgaben für den Entwicklungsingenieur dar.

1. EINFÜHRUNG

Schwerpunkt der Auslegung der genutzten Zahnradpaare in der modernen Fahrzeugindustrie ist die zielführende Bestimmung der Mikrogeometrie. Das Ziel des Verfahrens ist die Optimierung der Funktionsparameter im gewünschten Betriebszustand. Solche Parameter sind z.B. das Tragbild oder die Drehwegabweichung im definierten Lastbereich.

Es muss beachtet werden, dass die Verzahnung des Zahnradpaars nur für einen spezifizierten Momentbereich optimierbar ist, somit definieren wir bei der Bestimmung der Anforderungen auch die Qualitätskennzahlen der Mikrogeometrie.

Wir sollen bei der Erstellung der fachlichen Unterlagen auf die genaue Angabe der verwandten Standards achten, weil die Deutung der Vorzeichen der verschiedenen Modifikationen bei verschiedenen Standards

unterschiedlich ist. Die Bestimmung der Art der Korrekturen, ob sie additiv oder nicht additiv sind, ist auch unbedingt notwendig.

Die nächsten Abschnitte werden einen Einblick in diese Thematik ermöglichen. Bei der Formulierung der Feststellungen wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

2. VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE BESTIMMUNG DER MODIFIKATIONEN

Bei der Bestimmung der Mikrogeometrie muss beachtet werden, dass im Mikrometerbereich stehende Korrekturen vorgeschrieben werden, die mit den Toleranzen der Feinbearbeitung in selber Größenordnung stehen.

Daher müssen nicht nur das Verhalten der Nenngeometrie, sondern auch die Stabilität der Funktionsparameter im ganzen Toleranzbereich bei der Auswahl der Zielauslegung beachten.

Eine entsprechend korrigierte Verzahnung kann die innere Verformung des Antriebs und die auftretenden dynamischen Zufallsbelastungen effektiv kompensieren. Für diese Funktionen ist die Sicherstellung des entsprechenden Spiels der Verzahnungen in allen Betriebszuständen zwingend notwendig. Bei Festlegung der Modifikationen müssen das ganze Verformungssystem des Antriebs, die Wärmeausdehnung der Verzahnungen und das Knicken der einzelnen Zähne unter Belastung berücksichtigt werden. Wichtig ist es, dass die angewandten additiven Korrekturen das Verzahnungsspiel verkleinern können.

Um die Mikrogeometrie bestimmen zu können, müssen die inneren Systemverformungen exakt bekannt sein. Die Steifigkeitseigenschaften und die Steifigkeitsmatrix des Getriebegehäuses, die Steifigkeitsparameter der Wellen und der Lager, und die Lagerspiele müssen im Allgemeinen aufgrund der Innengeometrie festgelegt werden, und die Betriebsspiele der Lagerungen und der Zahnradkontakte bei den vorgeschriebenen Betriebstemperaturen bekannt sein.

In dieser Phase der Entwicklung sind die Grundgeometrie der Verzahnungen und alle

Elemente des Antriebs, außer kleinen Änderungen, bereits festgelegt.

3. PRAXISNAHER AUFBAU DER MIKROGEOMETRIE

Bei der Festlegung der Mikrogeometrie können mehrere Strategien verfolgt werden. Bei zylindrischen Geradverzahnungen kann der Ansatz gestellt werden, dass die Anwendung der Höhenballigkeit und der Breitenballigkeit ohne andere Korrekturen im ersten Schritt zur Mikrogeometrieauslegung führt. Im Hintergrund dieser Empfehlung steht, dass die Breitenballigkeit im begrenzten Verhältnis zur Ausgleichung der Verschiebung der Wellen maßgebend ist, dadurch kann die Breitenballigkeit in einzelnen Fällen die Schrägungswinkelkorrektur vertreten. Bei der Ausgleichung des Verzahnungsstoßes ist die Höhenballigkeit, wie die Kopf- und Fußrücknahmen, maßgebend. Dieses Potential kann bei Geradverzahnungen am besten ausgenutzt werden. Bei Schrägverzahnungen wird die Anwendung der Kopf- und Fußrücknahmen empfohlen.

4. MODIFIKATIONEN IN DER FLANKENRICHTUNG

Das Potential der Anwendung der Breitenballigkeit wurde bereits erwähnt. Diese Modifikation ist im Allgemeinen in einem Profil des Zahnradkontaktes ausgelegt. In der Praxis ist die Benutzung der Schrägungswinkelkorrektur typischerweise auch notwendig, die normalerweise beide Zahnräder betrifft. Diese Korrektur ist in den meisten Fällen in den rechten und linken Flanken beider Zahnräder unterschiedlich. Der Hintergrund ist, dass die Verformung des Wellensystems, insbesondere bei schrägverzahnnten Zahnradpaaren, bei Kontakt zu den anderen Flanken deutlich unterschiedlich ist.

Auch die Endrücknahme der Zahnflanken kann zugrunde gelegt werden. Diese Möglichkeit ist im Allgemeinen bei Geradverzahnungen von großer Bedeutung. In der Praxis werden die Breitenballigkeit und die Schrägungswinkelmodifikation am häufigsten zusammen verwendet.

Bei der Veränderung der geschliffenen Verzahnungen in der Serienfertigung sind die Korrekturen der Flankenlinien besonders wichtig, weil diese Modifikationen beim Schnecken- und Profilschleifen mit der

Kinematik der Werkzeugmaschine hergestellt werden, deshalb können diese Parameter ohne Werkzeugänderung verändert werden. Die Entwicklungsingenieure versuchen zunächst die Optimierung mit der Neudefinition dieser Korrekturarten durchzuführen und einen höheren Kostenaufwand zu vermeiden. Profilmodifikationen sind durch das Werkzeug bedingt, deshalb ist eine Veränderung dieser Parameter nur mit Werkzeugänderungen möglich.

Bei gehonten Zahnrädern besteht diese Möglichkeit nicht, weil die Werkzeuggeometrie in diesem Fall auch die Korrekturen der Flankenlinien enthält.

5. MODIFIKATIONEN IN DER PROFILRICHTUNG

Die Höhenballigkeit von den Profilmodifikationen wurde bereits erörtert. Die Möglichkeit der Kopf- und Fußrücknahmen wurde kurz ebenfalls angesprochen. Die sogenannte lineare Rücknahme ist die einfachste und am häufigsten verwendete Art der letzten Korrekturen. Bei dieser Modifikationsart wird das Zahnprofil in der Nähe des Kopfkreises mit einer Evolvente größeren und in der Nähe des Fußkreises mit einer Evolvente kleineren Profilwinkels verändert. Natürlich sind Kopf- und Fußrücknahmen auch separat anwendbar. Die Geometrie der linearen Rücknahme wird durch den Betrag und den Startdurchmesser der Modifikation wegen des Evolventenverlaufs eindeutig definiert. Der Betrag ist immer durch den Kopfnutz- und Fußnutzkreisdruchmesser festgelegt.

Wir haben auch eine Möglichkeit für die Benutzung eines sogenannten Übergangsradius zwischen Evolventen der Rücknahme und des Grundprofils. Diese Möglichkeit gilt oft als separater Typ, aber der Übergangsradius ist in der Praxis im Allgemeinen kein festgelegter Parameter, sondern eine Folge der Feinbearbeitung. Das Phänomen ist bei der Anwendung der Polierschleifentechnologien insbesondere anschaulich, was auf die Werkzeugsverformung bei der Bearbeitung zurückzuführen ist.

Es gibt weitere Möglichkeiten für eine bogenförmige und eine progressive Kopf- und Fußrücknahme. Die progressive Art ist in der Praxis unter diesen Typen häufig anzutreffen. Bei der Benutzung dieser Modifikation bestimmen wir neben dem Betrag und dem

Startdurchmesser auch einen Korrektionsfaktor, der das progressive Verhalten des Modifikationsverlaufs festlegt.

Eine weitere wichtige Modifikationsart ist die Eingriffswinkelmodifikation. Bei dieser Korrektur werden die Profilwinkel der Grundevolvente verändert.

6. WEITERE MODIFIKATIONEN

Es gibt Modifikationen, die weder in die Profilmodifikationen noch in die Flankenlinienmodifikation eindeutig eingeordnet werden können. Solche Modifikation ist die sogenannte dreieckförmige Rücknahme. Bei dieser Korrekturart wird im Wesentlichen eine diagonale Kopf- und Fußrücknahme in der Zahnflanke durchgeführt. Diese Modifikation ist wichtig wegen ihres Verlaufs bei Schrägverzahnungen, weil die Kontaktlinien in diesem Fall in der Zahnflanke schräg liegen. Die andere wichtige Korrekturart in dieser Gruppe ist die Verschränkung, die die Verwindung der Zahnflanke bedeutet.

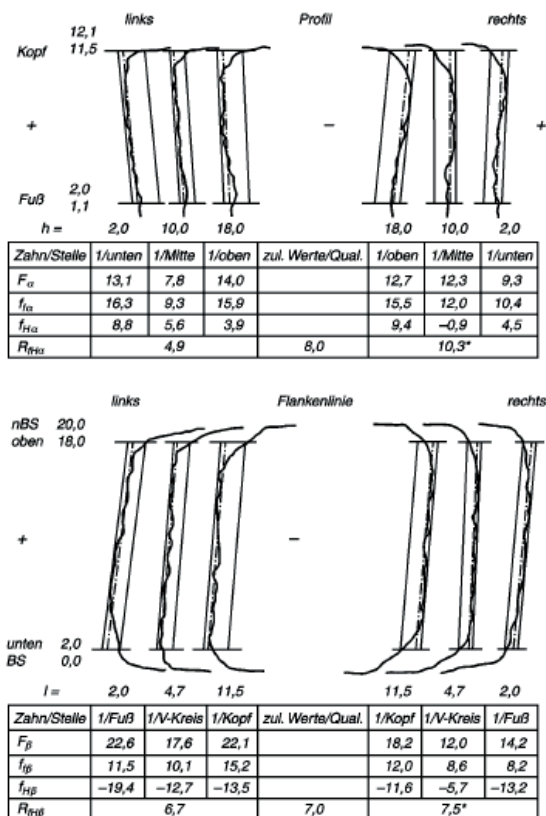


Bild 1.: Auswertung der Verschränkung bei klassischen 3D-Verzahnungsmessungen [6]

Die bis jetzt vorgestellte Mikrokorrekturen können immer mit vordefinierten geometrischen Kennzahlen charakterisiert

werden. In besonderen Fällen mag die topologische Korrektur der Verzahnungen notwendig sein. Das Verfahren gibt eine Möglichkeit der ganz freien Veränderung der Geometrie. Wir geben hier die Position der einzelnen Punkte der Zahnflanken zur Referenzoberfläche an, die normalerweise die nichtkorrigierte, geschliffene Geometrie ist.

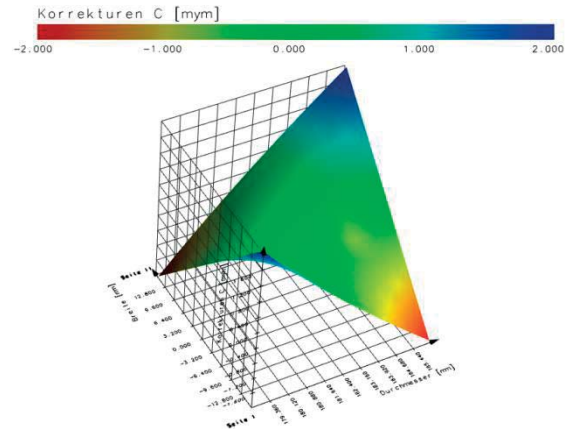


Bild 2.: Betrag der Verschränkung in der Zahnflanke (Bild hergestellt mit KISSsoft)

7. AUSWERTUNG DER AUSGELEGTEN GEOMETRIE MIT MESSUNGEN

Die Wirksamkeit der mit der theoretischen Methoden ausgelegten Zahngeometrie muss durch den Versuchen in allen Fällen unbedingt überprüft werden. Die Entsprechung der einzelnen Verzahnungen den verschiedenen Tragfähigkeitskriterien kann mit den festgelegten Lastkollektiven relativ einfach überprüft werden. Diese Kollektiven werden am Anfang der Entwicklung festgelegt. Diese Dauertests werden die Entsprechung den Flanken-, Zahnfuß-, Fressen- und andere Tragfähigkeitskriterien zeigen.

Die Abhängigkeit vom Drehmoment der Kontaktoberflächen der Verzahnungen kann mit der Tragbildanalyse überprüft werden. Die Zahnflanken werden bei dieser Analyse mit einem speziellen Lack bezogen. Die genutzte Farbe wird aufgrund der Umstände des Versuchs ausgewählt. Es gibt Lacke, die gegen Getriebeöl resistent sind, mit den wir den Antrieb im Betriebszustand im ganzen Momentbereich analysieren können. Diese Lacktypen lassen sich von den Zahnflanken etwas grob entfernen, deshalb ist die Kontur des Tragbildes nicht ganz klar.

Wir können auch solche Lacke nutzen, die das Tragbildkontur klarer zeigen, aber das Getriebeöl löst im Allgemeinen diese Varianten

auf. Diese Möglichkeiten werden typischerweise bei präparierten Getrieben bei manuellem oder anderem, mit kleinem Moment getätigtem Betrieb genutzt.

Die Ergebnisse der Tragbildanalyse müssen unbedingt durch eine ganzheitliche geometrische Messung des Antriebs mit 3D-Messmaschine ausgewertet werden. In einem anderen Fall kann die Untersuchung der Auffälligkeiten nicht durchgeführt werden. Wenn wir z.B. einen ungleichmäßigen Tragbildverlauf im Umfang des Zahnrads analysieren, müssen die geometrischen Abweichungen des Systems unbedingt genau bekannt sein. Wir können nur in diesem Fall entscheiden, ob dieses Phänomen wegen Qualitäts- oder Konstruktionsfehler auftritt.

Akustikanalysen stellen einen weiteren, wichtigen Versuchstyp für die Entscheidung der Entsprechung der Funktionsparameter der ausgelegten Geometrie dar. Bei diesen Tests untersuchen wir den Körperschall und den ausgestrahlten Luftschall des Antriebs. In unserem Fall ist die Auswertung der Kontaktfrequenzen, Oberfrequenzen der Zahnradverbindungen und des Modulationspektrums dieser Komponenten am wichtigsten. Ein Getriebe kann mit mehreren Motorvarianten zusammgebaut und in mehreren Fahrzeugen eingebaut werden. Die Herstellung solcher anregungsoptimierten Getriebe ist unverzichtbar, da sie die Wahrscheinlichkeit der Probleme bei den verschiedenen künftigen Kombinationen am effektivsten minimieren können.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Während unserer Untersuchungen wurde die Entwicklung der Zahnräder in der modernen Fahrzeugs-industrie durch die Bestimmung der gewünschten Modifikationen ermittelt. Die wichtigsten Voraussetzungen wurden zur Festlegung der Mikrogeometrie erörtert. Es wurde in die Thematik des praxisnahen Aufbaus der Geometrie einen Einblick ermöglicht. Die charakteristischen Typen der Profil-, Flanken-, und Spezialkorrekturen wurden vorgestellt. Außer diesen Themen wurden auch die Spezialfragen der nachträglichen Veränderungen der Mikrogeometrie ermittelt. Nach dem Überblick der verschiedenen Möglichkeiten wurden die für die Auswertung der festgestellten Geometrie benötigten wichtigsten Tests erörtert.

Die vorgestellten Themenbereiche zeigen die Komplexität der Auslegung der Mikrogeometrie und die Schwierigkeiten bei der Auswahl der optimalen Variante. Aufgrund der Komplexität und der Sensitivität des Verhalten des Gesamtsystems stellt die genaue Bestimmung der Modifikationen eine der vielseitigsten Aufgaben der Entwicklungsingenieure dar.

„The described article/presentation/study was carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-2016-00011 “Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation” project implemented in the framework of the Szechenyi 2020 program. The realization of this project is supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund.”

LITERATUR

- [1] Constantin Weber, Kurt Banaschek: Formänderung und Profilirücknahme bei gerad- und schrägverzahnten Rädern. Bd. 11. Schriftenreihe Antriebstechnik. Braunschweig: Vieweg-Verlag, 1953
- [2] DIN3960 Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung, 1987.03.
- [3] ISO 21771 Gears - Cylindrical involute gears and gear pairs - Concepts and geometry, 2007.09.
- [4] ISO 6336-1 Calculation of load capacity of spur and helical gears - Basic principles, introduction and general influence factors, 2006.09.
- [5] Kamondi László: Verminderung der Eingriffsschwingungsanregung bei schrägverzahnten zylindrischen Stirnrädern durch Modifikation der Eingriffsfläche. Tagung Zahnradgetriebe. Dresden. 6 bis 8. November 1989.
- [6] VDI/VDE 2607 Rechnerunterstützte Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil, 2000.02.
- [7] VDI/VDE 2612 Profil- und Flankenlinienprüfung an Zylinderrädern mit Evolventprofil, 2000.05.