

BERECHNEN UND MESSEN GEKRÜMMTER FLÄCHEN
AUF GRUND DER ERZEUGUNGSKINEMATIK
AM BEISPIEL DER SPIRALKEGELRÄDER

ABHANDLUNG

zur Erlangung

der Würde eines Doktors der technischen
Wissenschaften

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZUERICH

vorgelegt von

PAUL FORT

dipl.Masch.-Ing. ETH

geboren am 13. Mai 1947

in Prag (CSSR)

Prof. E. Matthias, Referent

Prof. M. Sayir, Korreferent

7. Zusammenfassung

Die Beschreibung räumlich gekrümmter Flächen mittels Simulation der Werkzeugmaschine findet ihre Anwendung besonders in der Untersuchung der Verzahnung. Ausgehend von der Maschinenkinematik und der Werkzeuggeometrie wird das ganze Herstellungsverfahren rechnerisch nachgebildet.

Beim Aufbau mathematischer Modelle ist es oft schwierig, alle Einflussfaktoren rechnerisch oder messtechnisch zu erfassen. Trotzdem sollen solche Modelle dazu beitragen, einen Teil der Entwicklungsarbeiten an neuen Maschinen und Getrieben aus der Werkstatt ins Konstruktionsbüro zu übertragen.

Die Bestimmung einer Hüllfläche bildet eine Schlüsselaufgabe in der Untersuchung der Verzahnungsgeometrie. Das Problem der Linnüllung zweier um zwei windschiefe Achsen rotierenden Flächen konnte hier auf analytischem Wege und ohne Iteration gelöst werden.

Diese für die allgemeine Achsenlage gefundenen Beziehungen lassen sich auf jede bekannte Art der Zahnradherstellung oder Getriebeanordnung anwenden, womit auch eine mathematische Basis für die Quervergleiche zwischen verschiedenen Verzahnungsarten gegeben ist.

Als besonderer Vorteil dieser Berechnungsmethode wird die Tatsache angesehen, dass die Herleitungen unabhängig von der Form der Erzeugungsfläche durchgeführt werden konnten. Damit behalten die Beziehungen ihre Gültigkeit für jede zulässige Form der Werkzeugschneide, bzw. Gegenraufanke. Die Eingriffsverhältnisse im Getriebe können mit denselben Beziehungen simuliert werden.

Der geometrische Ort aller Berührungslinien (Charakteristiken) bildet im Raum das sogenannte Eingriffsfeld, dessen zwei Doppellinien die Unterschnittgrenze (Interferenz) darstellen. Diese rechnerische Bestimmung des Unterschnittes sowie seine graphische Darstellung am Bildschirm hilft besonders bei der Auslegung der Spiralkegelräder (Bild 4.14) und der Schneckenräder. Die vom Unterschnitt verursachte Zahnfußschwächung bewirkt eine örtliche Spannungserhöhung und Materialbeanspruchung.

Die Zahnflanken, als Gitter berechnet, lassen sich gut räumlich darstellen und aus beliebigen Blickwinkeln oder in beliebigen Schnitten abbilden. In jedem Gitterpunkt kennt man ausserdem die Gleitgeschwindigkeit (Läppwirkung, Verschleiss) die Krümmungsradien (Hertzsche Pressungen) und viele weiteren Parameter.

Den nächsten Schritt bei der Getriebeauslegung stellt die Zahnkontaktanalyse dar. Aus dem spielfreien Abwälzen der berechneten Radflanke wird unter Berücksichtigung der Getriebegeometrie eine exakte Flanke des Gegenrades bestimmt. Dieses exakte Zahnradpaar würde beim Abrollen das volltragende Tragbild aufweisen. Aus dem Vergleich der exakten Radflanke mit der korrigierten, realen Flanke können ausreichende Informationen über die Eingriffsverhältnisse, die Kontaktlinie (Path of Contact) , die Uebertragungsfehler und die Tragbildlage gewonnen werden. Aehnlich lassen sich auch die Einflüsse der Achsverlängerungen untersuchen (V-H Test).

Die 3-D Messungen gekrümmter Flächen geben die Voraussetzungen für ihre reproduzierbare Fertigung. Am Beispiel der Spiralkegelräder wurde das Messen, Darstellen und Auswerten der Einzelflankenfehler demonstriert. Mit automatischen CNC-Messprogrammen wurde die gesamte Mess- und Auswertezeit pro Flanke unter 4 Minuten reduziert. Dank der hohen Messgeschwindigkeit und der einfachen Handhabung der modular aufgebauten Programme hat sich eine für die Kegelradentwicklung eingesetzte Pilotanlage bestens bewährt.

Damit wurden auch Voraussetzungen für den industriellen Einsatz dieser Messmethoden erfüllt. Mit Erfolg wurde diese Methode auch zur Kontrolle von schwer erfassbaren Herstellungsoperationen eingesetzt. Das Messen der Härteverzüge, des Läppabtrages und des Zahnflankenverschleisses ist dank der guten Reproduzierbarkeit der Messungen problemlos realisierbar. Erst eine quantitative Erfassung dieser Vorgänge liefert die notwendigen Unterlagen zu deren Optimierung.

Zur Auswertung der Messergebnisse wurde wieder die Simulationsmethode beigezogen. Zu den gemessenen Einzelflankenfehlern werden die korrigierte Einstellung der Werkzeugmaschine und der Werkzeuggeometrie gesucht. Durch praktische Versuche an Spiralkegelrädern wurde die Richtigkeit dieser Korrekturwerte bestätigt. Mit den Korrekturwerten geschnittene Zahnräder haben praktisch keine Abweichungen vom gerechneten Idealprofil. Messbar ist lediglich der Anteil der Oberflächenrauheit.

Die praktische Anwendung der hier entwickelten Methode ist insbesondere für die Automobilindustrie von grossem Interesse, da bei der Massenfertigung der Spiral- und Hypoidkegelräder teilweise noch erhebliche Schwierigkeiten vorhanden sind. Die mathematische Optimierung der Flankentopographie und die quantitative Kontrolle der Herstellgenauigkeit werden hier sicher die Ausschussquoten stark reduzieren und die Wirtschaftlichkeit verbessern,

Auf den in dieser Arbeit angesprochenen Gebieten sind in Zukunft folgende Weiterentwicklungen zu erwarten:

- * Berücksichtigung der Maschinendynamik in mathematischen Modellen
- * Industrielle Anwendung der Zahnkontaktanalyse bei Kegelrad- und Schneckengetrieben
- * Weitere Entwicklung der 3-D Messtechnik, begünstigt durch den Einsatz leistungsfähiger Prozessrechner und auf die Messtechnik orientierter Programmiersprachen.