

3D-ABWEICHUNGSANALYSE KOMPLEXER ZAHNFLANKENGEOMETRIEN

Spreu vom Weizen trennen

Die Verzahnungsqualität modifizierter Zahnrädern wird immer noch überwiegend auf Basis nicht modifizierter Zahnflanken bewertet. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Laufeigenschaften und erschweren die exakte Fertigung und Überprüfung der Zahnflankentopografien. Ein Forschungsvorhaben schafft mit dem Aufbau geeigneter Qualitätsregelkreise die Voraussetzung für eine fertigungsgerechte Auslegung und eine prozesssichere Fertigung.

Robert Schmitt, Tilo Pfeifer und
Andreas Napierala, Aachen

Auf Grund der vielseitigen Einsatzgebiete von heutigen Getrieben kommt es für die einzelnen Zahnräder zu den unterschiedlichsten Belastungsfällen. Zudem erreichen moderne Motoren immer höhere Drehzahlen bei steigender Leistung. Unter diesen Voraussetzungen muss ein Getriebe hohen Ansprüchen, z.B. bezüglich der Lebensdauer und geringer Geräusentwicklung, genügen. Um diesen Anforderungen gerecht werden zu können, werden die Zahnflanken entsprechend der jeweiligen Beanspruchung modifiziert, um beispielsweise den Eingriffsstoß sowie eine Pressüberhöhung zu vermeiden und die Verlagerungsempfindlichkeit der einzelnen Zahnräder zu verringern [1].

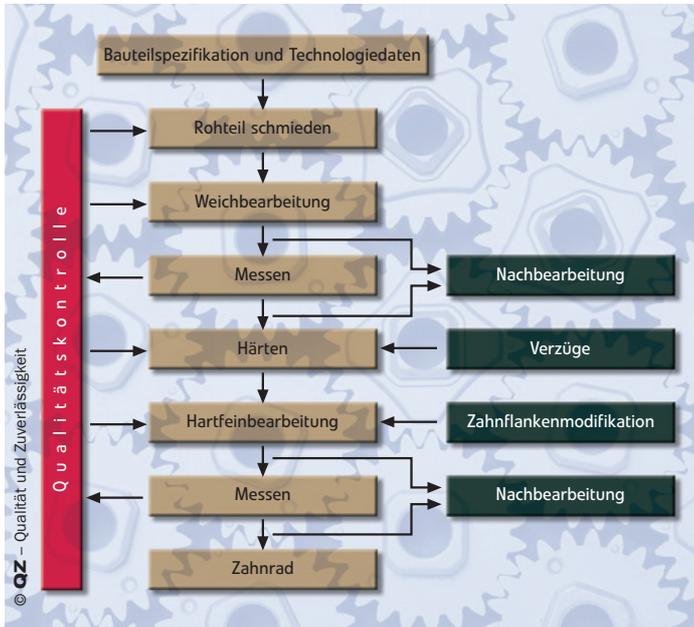
Neben den zahlreichen Kombinationsmög-

lichkeiten zwischen Vor- und Feinbearbeitungsverfahren mit definierter und nichtdefinierter Schneide bilden zusätzlich die unterschiedlichen Fähigkeiten der eingesetzten Fertigungsverfahren zur Erzeugung von Zahnflankenmodifikationen sowohl für den Konstrukteur als auch für den Fertigungsfachmann ein nur schwer zu überblickendes Problemfeld. Bereits in der Konstruktionsphase muss die

Herstellbarkeit der ausgelegten Modifikationen überprüft werden können. Das resultierende Lauf- und Lastverhalten einer Zahnradpaarung wird in erster Linie ursächlich aus der Kontaktgeometrie des Zahneingriffs hergeleitet, die durch gezielt ausgelegte Flankenmodifikationen sowie fertigungs- und montagebedingte Abweichungen und lastbedingte Verformungen des Gesamtsystems bestimmt wird [2].

Eine effiziente und prozessorientierte Fertigungsüberwachung muss insbesondere auf die verschiedenen Hartfeinbearbeitungsverfahren eingehen, da die Erzeugung von Zahnflankenmodifikationen hauptsächlich in den letzten Fertigungsschritten erfolgt (Bild 1). Die Geometrie der Zahnflankenmodifikationen reicht von einer Breiten- bzw. Höhenballigkeit bis hin zur Modifika- ▷

Bild 1. Erzeugung komplexer Zahnflankengeometrien



tion der Zahnflankentopografie, wodurch sehr hohe Anforderungen an die Mess- und Auswertemethoden heutiger Zahnradmesssysteme gestellt werden [3]. Daher sind Messergebnisse in Form einfacher Topografiebilder bzw. zweidimensionaler Messschriebe als Grundlage für die Prozessüberwachung und -regelung bei der Zahnradherstellung oft nicht mehr ausreichend. So werden für die effiziente Bewertung modifizierter Verzahnungen insbesondere gefordert:

- eine schnelle und hochgenaue 3D-Topografieerfassung,
- eine 3D-basierte Auswertung und
- eindeutig quantifizierbare, funktionsorientierte Topografiekenwerte.

Um hier eine praxistaugliche Lösung zu erarbeiten, wird am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement der RWTH Aachen ein neuer Ansatz zur messtechnischen Analyse und zur Bewertung modifizierter Zahnflankentopografien verfolgt. Dabei werden Form-

abweichungen der Zahnflanke als eine gekrümmte dreidimensionale Oberfläche betrachtet. Dies erfordert die Ableitung von geeigneten 3D-basierten Parametern zur numerischen Beschreibung der Topografieabweichungen. Diese charakteristischen Flankenformparameter bilden die Grundlage für eine funktions- und fertigungsprozessgerechtere Visualisierung und Beurteilung der Zahnflankengeometrien.

Charakteristische Flankenformparameter ableiten

Für eine gezielte Analyse der Flankenformabweichungen eignen sich in erster Linie Approximationsalgorithmen, die es ermöglichen, die erfassten Topografieabweichungen in eindeutig definierte Grundformen systematisch zu zerlegen und charakteristische Flankenformparameter zu ermitteln. Die Lösung ist die Konzeption einer praxistauglichen und

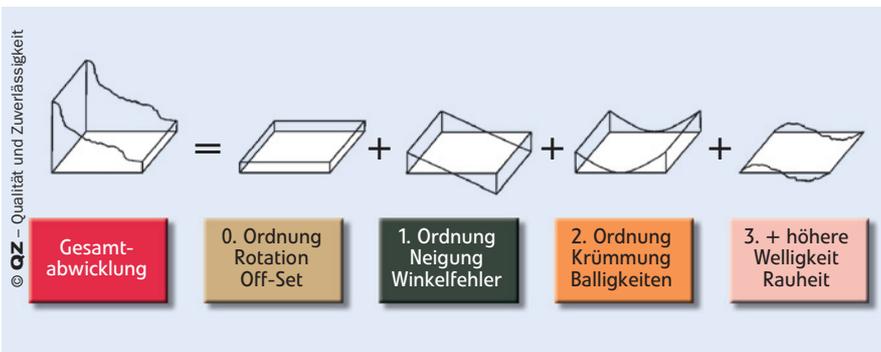


Bild 2. Lösungsansatz zur Ableitung charakteristischer Flankenformparameter

Projekt

Die Forschungsarbeiten erfolgen im Rahmen des Projektes „Entwicklung von funktionsorientierten Bewertungsstrategien modifizierter Verzahnungen“, das vom Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen initiiert wurde. Das Projekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn, unter der Projektnummer Pf 109/64 gefördert.

Literatur

- 1 Mauer, G.: Gezielte Verbesserung der Leistungsübertragung von Zahnradgetrieben durch Flankenkorrekturen. Dissertation, RWTH Aachen 1990
- 2 Faulstich, I.: Bearbeitung der Flanken gehärteter Zylinderräder durch Schälwälzfräsen und Hartschälern. Technische Akademie Wuppertal 1991
- 3 Wengler, S.: Modifikationen der Flankengeometrie an Zylinderradverzahnungen. VDI-Berichte Nr. 1673. VDI-Verlag, Düsseldorf 2002
- 4 Pfeifer, T.; Kurokawa, S.; Meyer, S.: Derivation of parameters of global form deviations for 3-dimensional surfaces in actual manufacturing processes. Measurement 29/2001, S. 179-200
- 5 Pfeifer, T.; Napierala, A.: Entwicklung einer funktionsorientierten Bewertung modifizierter Zahnflankengeometrien. In: VDI-Berichte Nr. 1673. VDI-Verlag, Düsseldorf 2002
- 6 Pfeifer, T.; Napierala, A.: Scanning on coordinate measuring machines. XVI Imeko World Congress IMEKO 2000, 25.-28. September 2000, Vienna, Austria

verifizierbaren Vorgehensweise zur Separation der Topografieabweichungen zunächst in vier wohl definierbare Anteile der Geometrieabweichungen von Zahnflanken (Bild 2) [4, 5].

Fertigungsfehler, die durch eine ungeeignete Einstellung der Schnittaufteilungen und Werkzeugbahnen bzw. durch fehlerhafte Schleifscheiben von Werkzeugmaschinen bedingt sind, erscheinen in der Regel als Abweichungen niedriger Ordnung. Daher ist es zweckmäßig, die Formabweichungen niedriger Ordnung zu separieren und getrennt zu beschreiben. Die verbleibenden Abweichungen höherer Ordnung bestehen aus anderen Anteilen,

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt, geb. 1961, ist Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement und Mitglied des Direktoriums des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der RWTH Aachen sowie als Leiter der Abteilung Mess- und Qualitätstechnik des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie (IPT) Mitglied des Direktoriums des Fraunhofer IPT.

Prof. em. Dr.-Ing. Tilo Pfeifer, geb. 1939, war bis zu seiner Emeritierung 2004 Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen und Leiter der Abteilung Mess- und Qualitätstechnik des Fraunhofer IPT. Er ist Vorsitzender des wissenschaftlichen Beirats der Deutschen Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ), Vorsitzender der Gesellschaft für Qualitätswissenschaft (GQW) und Mitglied der International Academy of Quality (IAQ).

Dipl.-Ing. Andreas Napierala, geb. 1964, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement des WZL.

Kontakt

Andreas Napierala
T 02 41/80-26296
a.napierala@wzl.rwth-aachen.de

wie z.B. Vorschubmarken, Welligkeiten, Rauigkeiten und Bearbeitungsriefen, hervorgerufen durch das Ausbrechen von Schneidkanten, unzureichendes Nachschleifen von Schneiden oder unzureichendes Abrichten von Schleifscheiben.

Im Weiteren werden exemplarisch die Formabweichungen 2. Ordnung näher betrachtet. Sie werden durch räumlich gewölbte Ausgleichsflächen approximiert, welche gezielt die Krümmungsart und -richtung der globalen Topografie beschreiben sollen. Die Parameter für die Formabweichungen 2. Ordnung lassen sich durch bestimmte Fundamentalformen der Flächen 2. Ordnung und Transformationen (Rotation, Translation und Skalierung) ausdrücken. Anhand so definierter Parameter können neben den so genannten Balligkeiten auch Verwindungen und teilweise Rücknahmen mathematisch eindeutig und systematisch beschrieben werden. Da die erzielten Er-

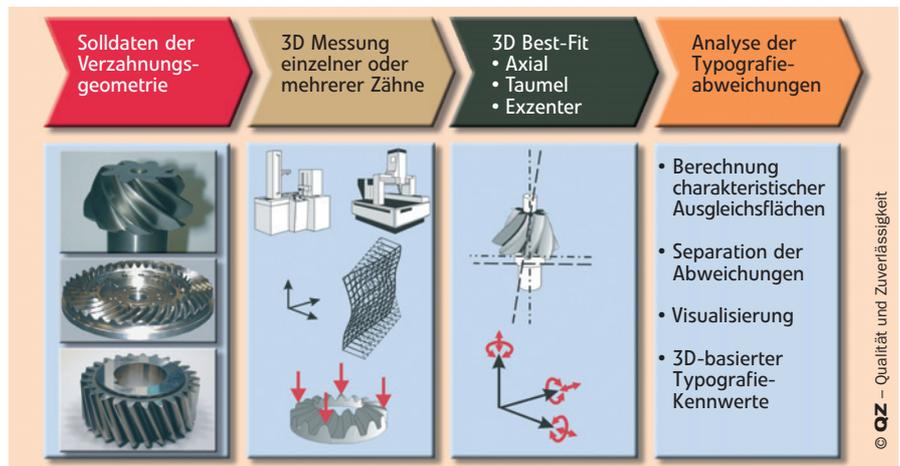


Bild 3. Vorgehensweise bei der Messung und Auswertung von Topografieabweichungen

gebnisse von der Wahl der Fundamentalform abhängig sein können, wird im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens die Auswirkung der einzelnen Fundamentalformen auf die Parameter 2. Ordnung gesondert untersucht.

Gezielt messen und auswerten

Zur Verifikation des entwickelten Bewertungsverfahrens waren mehrere Verzahnungsarten Gegenstand der Untersuchungen. Es wurden sowohl modifizierte Stirnräder als auch Kegelradverzahnungen messtechnisch erfasst und ausgewertet, um eine allgemeine Gültigkeit der entwickelten Methodik zu belegen. Die messtechnische Erfassung der Flankentopografie erfolgte überwiegend auf universellen Koordinatenmessgeräten. Darüber hinaus wurde die Scanning-Technologie genutzt, um Messzyklen zu verkürzen und somit deutlich mehr Messpunkte pro Zahnflanke in kürzester Zeit aufzunehmen [6].

Die Vorgehensweise zur Anwendung des Separationsverfahrens beinhaltet die Bereitstellung der Solldaten, eine 3D-Erfassung der Zahnflanken mit geeigneten Messmitteln, gegebenenfalls eine Exzenter- bzw. Taumelkorrektur und die eigentliche Analyse der Topografieabweichungen mit Hilfe der entwickelten Separationssoftware (Bild 3).

Prozessorientiert visualisieren

Zurzeit werden verschiedene Möglichkeiten einer fertigungsprozessorientierten Bewertung der messtechnisch erfassten Topografie-Istwerte unter Anwendung der entwickelten Methodik geprüft. Eine

wichtige Aufgabe ist hier die Konzeption praxistauglicher Strategien, die eine Überwachung der Verzahnprozesse im Sinne der statistischen Prozessregelung erlauben. Dies kann durch eine gezielte Quantifizierung und Visualisierung der Topografieabweichungen unter Verwendung der entwickelten Auswertesoftware erreicht werden. So wird beispielsweise eine Fähigkeitsanalyse der Fertigungsprozesse auf Basis von Topografiemessungen erstmals überhaupt möglich. Es führt überdies zu mehr Transparenz bei der Analyse und Bewertung von Fertigungsfehlern anhand von Topografieabweichungen und kann zunächst ergänzend zu den bestehenden und etablierten Auswertepraktiken eingesetzt werden.

Das vorgestellte Auswerteverfahren ermöglicht eine systematische Zerlegung der Abweichungen in vier Arten von globalen Formabweichungen. Durch eine verzahnungsspezifische Normierung der abgeleiteten Abweichungskomponenten lassen sich die so zerlegten Formabweichungen der Topografie anschaulich visualisieren und entsprechende Kennwerte ermitteln. Auf Grund der Universalität des Separationsverfahrens ist es zudem möglich, die vorgestellte Methodik gleichermaßen bei der Bewertung von Fertigungsfehlern einer nicht modifizierten Verzahnung effektiv einzusetzen. Außerdem werden hier die erzielbaren Ergebnisse prinzipbedingt kaum durch die Makrogeometrie der Zahnflanken beeinflusst. Daher kann das Verfahren nicht nur bei evolventischen Stirnrädern, sondern langfristig auch bei vielen anderen Verzahnungstypen, beispielsweise bei Kegel- oder Kronenrädern, effizient angewandt werden. □