

Problemstellung und Gegenstand der Arbeit

Die Schwingungsanregung im Zahnkontakt ist ein eingehend untersuchter und verstandener Vorgang, welcher aus verschiedenen Mechanismen herrührt [5, 8]. Die Weganregung, welche aus einer Abweichung von einem evolventischen Profil resultiert, wird neben gezielten Modifikationen maßgeblich vom Fertigungsprozess beeinflusst [7]. Aufgrund der Prozess-spezifischen Erzeugungskinematik bestehen hier wesentliche Unterschiede zwischen Fertigungsverfahren. Bei kontinuierlichen Verfahren, wie dem Wälzschleifen oder dem Honen, unterscheiden sich die prozessbedingten Strukturen der Flankentopografie aufgrund der Vorschubbewegung in axialer Richtung von Zahn zu Zahn. Insbesondere durch Abweichungen im Fertigungsprozess können so Strukturen auf der Zahnflanke entstehen, welche im Betrieb zur Anregung von Ordnungen ohne Bezug zur Zähnezahl führen [9].

Dies ist in zweierlei Hinsicht herausfordernd für die Analyse der Schwingungsanregung. Zum einen reicht es in der Regel nicht, nur einen Zahn und eine Profil- bzw. Flankenlinie zu vermessen, um derartige Strukturen zu erfassen [6]. Zum anderen ist zur Abbildung der Anregung im Zahnkontakt eine zahnweise veränderliche Flankentopografie zu berücksichtigen. Gegenüber zahnweise identischen Gestaltabweichungen erster Ordnung, welche ggf. durch einfache Eingriffe in die Prozesskinematik behoben werden können, sind komplexere Strukturen nur schwer einer konkreten Ursache zuzuordnen. Dies hindert eine gezielte Fehlerbehebung in der Prozesskette.

Das Wälzschleifen ist ein in der Hartfeinbearbeitung für mittlere bis große Stückzahlen weit verbreitetes Fertigungsverfahren [1] und steht aus diesem Grund im Fokus der Arbeit. In der Literatur existieren verschiedene Modelle zur Abbildung der Bearbeitung von Zahnrädern mittels Wälzschleifen [3, 4]. Motivation für diese ist allerdings zumeist ein besseres Prozessverständnis, um technologische Optimierungen vornehmen zu können. Damit ist auch eine Verknüpfung von einer durch Fehler im Prozess bedingten Flankentopografie und der daraus resultierenden Anregung - und damit eine wesentliche Grundlage um Maschinenhersteller zur Erkennung und Behebung kritischer Prozessabweichungen zu befähigen - bisher nicht ausreichend gegeben.

In dem mannigfaltigen Konglomerat der auf die Schwingungsanregung im Zahnkontakt Einfluss nehmenden Faktoren kommt den durch Fertigungsprozesse bedingten Anteilen eine in mancherlei Hinsicht besondere Bedeutung zu. Die erzeugten Zahnflanken (i) unterscheiden sich von Prozess zu Prozess (und Maschine zu Maschine), (ii) unterliegen prozessbedingten zeitlichen Veränderungen, (iii) werden selten im Konstruktionsprozess berücksichtigt und (iv) können Schwingungen, welche keinerlei Bezug zur Zahnradgeometrie aufweisen, hervorrufen.

Das Anliegen dieser Arbeit ist es, Abweichungen im Produktionsprozess und periodische Abweichungen auf der Zahnflanke sowie deren Auswirkung auf das Anregungsverhalten im Zahnkontakt in einen Zusammenhang zu bringen und somit Voraussetzungen für Beurteilung, Behebung und Prävention von geräuschkritischen Fertigungseinflüssen zu schaffen. Grundlage hierfür muss eine gegenüber genormter Zahnflankenbewertung deutlich erweiterte Analyse von gemessenen und simulierten Zahnflankentopografien bilden. Um die Auswirkung verschiedener Fertigungseinflüsse auf die Zahnflankentopografie separiert abbilden zu können, muss ein Simulationsmodell erstellt werden, welches die Abbildung repräsentativer Einflussfaktoren ermöglicht. Mithilfe der so erzeugten Flankentopografie mit „idealen Abweichungen“ soll eine systematische Bewertung des Anregungsverhaltens vorgenommen werden.

Wichtigste Erkenntnisse der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird ein Simulationsmodell entwickelt und validiert, welches die Hartfeinbearbeitung von Zahnrädern durch kontinuierliches Wälzschleifen abbildet. Dabei liegt ein besonderer Schwerpunkt auf der in fehlerbehafteten Prozessen erzeugten Flankentopografie und der Bewertung dieser hinsichtlich ihrer periodischen Strukturierung und des daraus resultierenden Einflusses auf den Drehfehler im Zahnkontakt. Wesentliche Erkenntnisse und deren Potenzial für Maschinenhersteller sind im Folgenden kurz zusammengefasst.

Eine inverse Transformation von in der Verzahnungsvermessung auffälligen Ordnungen vereinfacht die Assoziation zu Prozessabweichungen. Der in der Arbeit neu entwickelte Ansatz ermöglicht es, einzelne Ordnungen als Abweichungsmatrix auf der Zahnflanke darzustellen und somit Ausrichtung und Gestalt einzelner Ordnungen der Welligkeiten zu visualisieren. Damit steht ein hilfreiches Werkzeug bei der Ursachenanalyse zur Verfügung.

Nicht jede im Prozess auftretende Schwingung führt zu akustisch kritischen Strukturen. Es zeigt sich, dass Fehler-spezifisch verschiedene Prozessparameter zum Teil wesentlichen Einfluss auf die erzeugte Flankentopografie haben. Insbesondere bei im Verhältnis zur Zähnezahl des Rades unganzzahligen Ordnungen, wo der Winkel der resultierenden Welligkeit stark vom axialen Vorschub abhängig ist, können von der ursprünglichen Anregungsordnung deutlich abweichende Ordnungen auf der Zahnflanke auftreten.

Es bestehen teilweise sehr komplexe Zusammenhänge zwischen Fehler und resultierender Anregungsordnung. In Abhängigkeit der Fehlerart wirken sich oftmals die Gangzahl der Schnecke und der axiale Vorschub auf die entstehenden Ordnungen auf. Für einzelne Fehlerarten konnten in der Arbeit analytische Zusammenhänge abgeleitet werden. Da die analysierten und in der Praxis auch relevanten harmonischen Fehler teilweise Amplituden von unter einem Mikrometer haben, ist bei der Simulation zwingend auf eine hinreichend genaue Diskretisierung zu achten. Anregungen dazu sind in der Arbeit erarbeitet worden.

Voraussetzung für ein intelligentes Monitoring ist ein Prozessmodell - auf zusätzliche Sensorik kann ggf. verzichtet werden. In der Arbeit wird aufgezeigt, dass eine Bewertung der akustischen Wirksamkeit von Abweichungen im Schleifprozess nur mit Hilfe eines Modells erfolgen kann, welche die Wirkkette über erzeugte Flankentopografie bis hin zur Einordnung der akustischen Wirksamkeit der Struktur einbezieht. Die Datenbasis hierfür kann jedoch aufgrund der Vielzahl in modernen Maschinen integrierter Sensoren (Wegmesssysteme, Auswuchtsensorik, etc.) aus Sicht des Autors weitestgehend ohne Integration zusätzlicher Sensorik gewonnen werden.

Das Wälzschleifen ist ein zweistufiger Prozess. Im derzeitigen Stand des Simulationsmodells ist nur eine rudimentäre Abbildung von Fehlern aus dem Abrichtprozess möglich. Aktuelle Arbeiten von BÖTTGER, KIMME und DROSSEL [2] zeigen jedoch, dass hier deutlich komplexere Werkzeugfehler als bisher betrachtet entstehen können, was eine Integration in die Betrachtungen nahelegt. Weiterhin ist es sinnvoll, das Modell dahingehend zu erweitern, dass analog zur Arbeit von DIETZ [3] eine statische bzw. dynamische Verdrängung aufgrund der Prozesskräfte abgebildet werden kann, um eine zulässige Strukturierung bzw. erforderliche Prozessparameter für die Hartfeinbearbeitung definieren zu können.

Literatur

- [1] T. BAUSCH. *Innovative Zahnradfertigung: Verfahren Maschinen und Werkzeuge zur kostengünstigen Herstellung von Stirnrädern mit hoher Qualität*. 4., neu bearb. und aktualisierte Aufl. Renningen: expert-Verl., 2011. ISBN: 978-3-8169-2908-6.
- [2] J. BÖTTGER, S. KIMME und W.-G. DROSSEL. „Simulation of dressing process for continuous generating gear grinding“. In: *12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. 2018.
- [3] C. DIETZ. „Numerische Simulation des kontinuierlichen Wälzschleifprozesses unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens des Systems Maschine - Werkzeug - Werkstück“. Diss. ETH ZÜRICH, 2017. URL: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000171605>.
- [4] C. ESCHER. „Simulation und Optimierung der Erzeugung von Zahnflankenmodifikationen an Zylinderrädern“. Diss. 1996.
- [5] H. GEISER. *Grundlagen zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens von Stirnrädern*. Bd. 133. Lehrstuhl für Maschinenelemente, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebbau. München: Hieronymus, 2002. ISBN: 9783897912977.
- [6] G. GRAVEL und T. KAHNENBLEY. „Neue Entwicklungen zur Welligkeitsanalyse akustisch auffälliger Verzahnungen“. In: *6. Fachtagung Verzahnungsmesstechnik 2017*. Hrsg. von V. W. GMBH. Bd. 2017. VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2017, S. 43–54. ISBN: 9783180923161.
- [7] A. C. HOHLE. „Auswirkungen von Rauheit, Oberflächenstruktur und Fertigungsabweichung auf das Lauf- und Geräuschverhalten hartfeinbearbeiteter hochüberdeckender Zylinderräder“. Diss. Aachen, Techn. Hochsch, 2002. URL: <http://d-nb.info/969278810>.
- [8] H. LINKE. *Stirnradverzahnung / Berechnung, Werkstoffe, Fertigung*. München [u.a.]: Hanser, 1996. ISBN: 9783446187856.
- [9] B. RANK. „Welligkeiten auf Zahnflanken: Ursachen und akustische Auswirkungen“. In: *Verzahnungsmesstechnik 2014*. Hrsg. von V. W. GMBH. Bd. 2236. VDI-Berichte. Düsseldorf, 2014, S. 93–104. ISBN: 978-3-18-092236-2.