9 | 2025
vdi-z.de

VDI Fachmedien

VDI-Z

Führend in Produktion und Logistik

Sonderteil
Werkzeug-maschinen

Mit Logistik für Unternehmen

WERKZEUGMASCHINEN

Innovative Schleifprozesse beflügeln den Wettbewerb

DIGITALISIERUNG

Komplexität in der Werkzeug-Fertigung im Griff

LOGISTIKMANAGEMENT

KI-Agenten machen Lieferketten resilienter

Prozessüberwachung beim Wälzschleifen von Zahnrädern: Das Ziel lautet, potenziell geräuschkritische Werkstücke bereits im Schleifprozess zu erkennen, anstatt sie erst in der taktilen Messung oder im „End-of-Line"-Test zu erfassen, was zusätzliche Kosten verursacht. *Foto: Reishauer*

Herausforderungen und Lösungen in der E-Mobilität

Kontinuierliches Wälzschleifen

Der zunehmende Einfluss der E-Mobilität in der Automobilindustrie hat den Fokus im Zahnraddesign und die daraus resultierenden Herausforderungen in der Zahnradfertigung verändert – insbesondere beim kontinuierlichen Wälzschleifen. Vor allem der Teilbereich Geräusch, Vibration und Rauhigkeit (NVH) hat sich zu einem der wichtigsten Themen in der Konstruktion von Antriebssträngen für Kraftfahrzeuge entwickelt.

TEXT: *Maximilian Zimmer, Christoph Leonhardt*

Das Verständnis der Eigenschaften des Wälzschleifprozesses sowie für die Ursachen der Geräuschentstehung im Getriebe ermöglicht die Entwicklung von Methoden, die eine Optimierung des NVH-Verhaltens eines Zahnrads zulassen. Ein ganzheitlicher Ansatz muss hierbei den gesamten Prozess inklusive der Zahnradauslegung und alle beteiligten Fertigungsverfahren berücksichtigten.

Obwohl alle Parameter des Schleifprozesses nach „Best Practice"-Erfahrungswerten optimiert werden, ist es dennoch möglich, dass einzelne Zahnradpaare beim „End-of-Line"-Test aufgrund erhöhter Geräuschanregung ausfallen. In diesem Fall ist es wichtig, entsprechende Methoden zur Hand zu haben, mithilfe derer die Ursachen für Geräuschauffälligkeiten zuverlässig identifiziert und anschließend behoben werden können. Eine typische Ursache für geräuschkritische Welligkeiten auf der Zahnradflanke sind externe Anregungen von Komponenten der Schleifmaschine. Nachfolgend werden die grundlegenden Auswirkungen externer Anregungsfrequenzen in der Schleifmaschine veranschaulicht und ein Lösungsansatz vorgestellt.

Geräuschanregung bei E-Drives

Die Elektromobilität bringt neue Herausforderungen bei der Entwicklung von Getrieben mit sich. In der Regel weisen Elektrogetriebe hohe Übersetzungsverhältnisse bei hohen Eingangs-

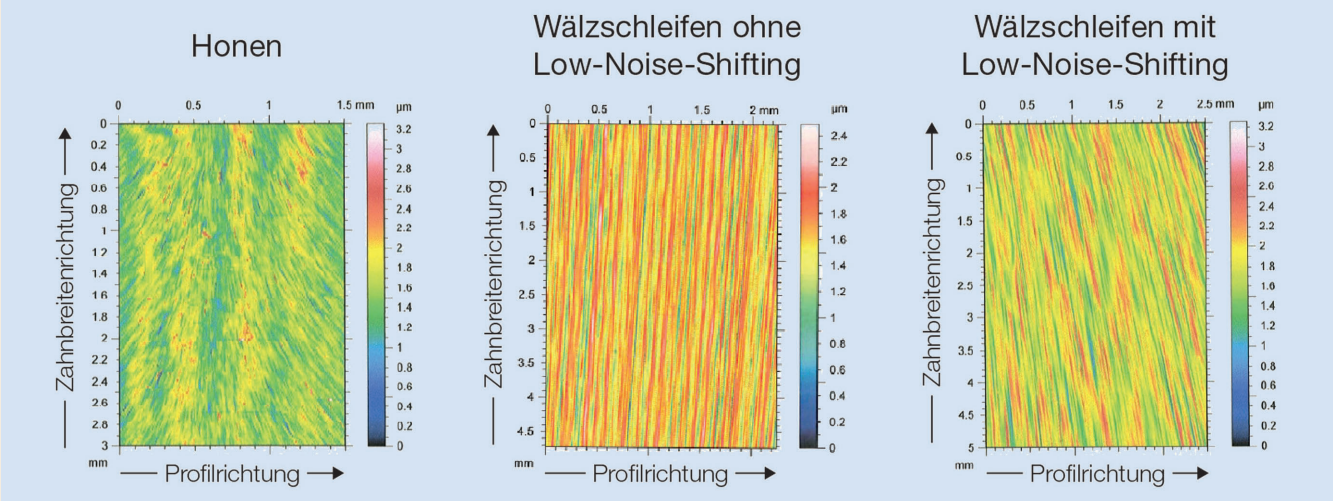

Bild 1. Oberflächenstrukturen aus unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren. Das Brechen regelmäßiger Oberflächenstrukturen reduziert tendenziell tonale Geräuschanregungen. *Grafik: Reishauer*

drehzahlen auf, was zu veränderten Eigenschaften im Zahneingriff führt. Die hohen Eingangsdrehzahlen haben direkten Einfluss auf die dynamische Anregung des Antriebsstrangs und der Getriebegehäusestruktur und beeinflussen damit das Getriebegeräusch maßgeblich. Die fehlende Geräuschmaskierung eines Verbrennungsmotors und die niedrigen Geräuschemissionen des Elektromotors verschärfen die Situation zusätzlich.

Kurzwellige Anregungen fallen bei schnelllaufenden Getrieben lediglich hinsichtlich der Zahneingriffsordnung (1. ZEO) ins Gewicht, wohingegen die Höherharmonischen mit zunehmender Drehzahl außerhalb des hörbaren Bereichs fallen. Demgegenüber liegen die Drehordnungen des Zahnrads und deren Höherharmonische über einen weiten Frequenzbereich im hörbaren und geräuschempfindlichen Bereich des menschlichen Ohrs.

„Die Lösung von NVH-Problemen ist insbesondere bei der Ursachenforschung eine komplexe Aufgabe."

Methoden zur Bewertung des Geräuschanregungsverhaltens

Um Getriebegeräusche quantifizierbar zu machen, werden im industriellen Umfeld spezielle Methoden eingesetzt. Typischerweise werden zum Beispiel Torsions- und Biegeschwingungen an den Radkörpern, der Körperschall an den Lagerschilden beziehungsweise den Getriebegehäusen oder Drehwinkel an den Radkörpern gemessen. An sogenannten End-of-Line (EoL)-Prüfständen wird entsprechende Messtechnik appliziert, um das NVH-Verhalten bewerten zu können.

Um schnell eine Korrelation zwischen den EoL-Ergebnissen und einer Zahnradmessung herzustellen, wird in der Industrie häufig auf die „Welligkeitsanalyse" zurückgegriffen [1]. Sie gestattet eine direkte Analyse der Profil- und Flankenlinienwelligkeit am einzelnen Zahnrad. Da diese Methode die periodischen Abweichungen direkt am jeweiligen Zahnrad ermittelt, ist sie eine sinnvolle Ergänzung zur Messung über ein Condition-Monitoring-System in der Schleifmaschine oder einen EoL-Prüfstand. Allerdings ist es im Allgemeinen mithilfe der Welligkeitsanalyse nicht möglich, eine Vorhersage über das Geräuschanregungsverhalten eines Zahnrads im Getriebegesamtsystem zu treffen.

Welligkeiten aus der Oberflächenstruktur

Die Rauheitsstruktur hängt von der Art des Hartfeinbearbeitungsverfahrens und der Schnittrichtung ab. Beim kontinuierlichen Wälzschleifen verlaufen die Rauheitsspitzen beziehungsweise -täler in Zahnbreitenrichtung. Daher entspricht die Oberflächenrauheit strukturell einer Welligkeit mit einer hohen Ordnung, die eine tonale Anregung verursachen kann. Für Eingriffswinkel $\alpha_{n,SS}$ von 15° bis 20° sind Wellenlängen von etwa 0,5 mm bis 0,7 mm oder 1,1 mm bis 1,5 mm zu erwarten [2]. Daraus ergibt sich eine geräuschkritische Anregungsfrequenz im Modulbereich von 0,15 mm bis 4,0 mm.

Um tonale Anregungen zu vermeiden, hat die Reishauer AG das sogenannte „Low-Noise-Shifting" (LNS) entwickelt. Dieses Verfahren sorgt dafür, dass die durchgängigen Schleifriefen in Zahnbreitenrichtung gebrochen werden. Die diffusere Oberflächenstruktur führt tendenziell zu einer weniger tonalen Anregung. **Bild 1** zeigt das allgemeine Erscheinungsbild der Rauheitsstruktur mit und ohne LNS im Vergleich zu einer durch Honen erzeugten Oberfläche.

Welligkeiten aus der Oberflächenrauheit

Fein- und Polierschleifen verbessern nicht nur die Flankentragfähigkeit und steigern den Wirkungsgrad der Verzahnung, sondern zielen auch darauf ab, die Geräuschanregung durch die reduzierte Oberflächenrauheit zu verringern. In **Bild 2** sind typische Oberflächenstrukturen der genannten Schleifverfahren dargestellt. Gegenüber dem Standardschleifprozess ist beim Feinschleifen eine reduzierte Rauheitsamplitude zu beobachten. Bei der polierten Oberfläche wurden die Rauheitsspitzen im Prozess abgetragen. Die reduzierten Rauheitsamplituden beim Fein- und

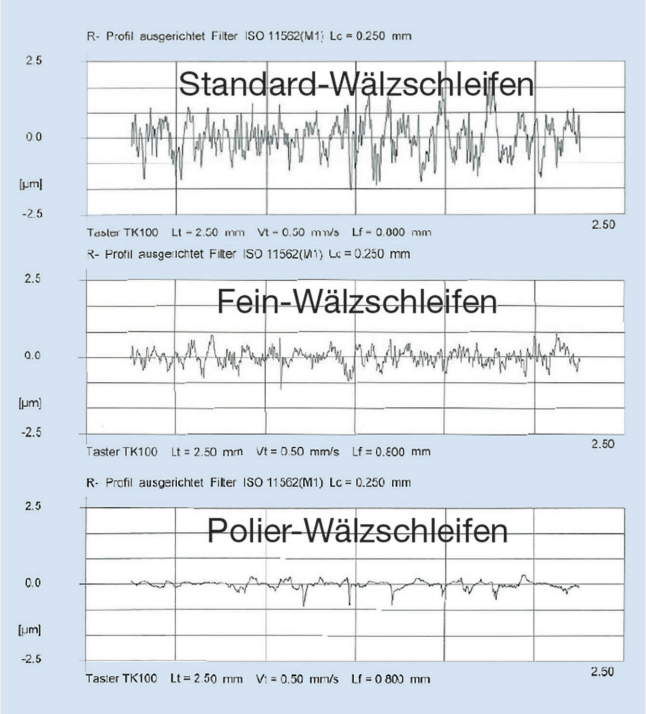

Bild 2. Oberflächenprofile der Zahnflanken nach Bearbeitung mit einer Standard-Schleifschnecke (oben), einer Feinschleifschnecke (Mitte) und einer Polierschleifschnecke (unten). *Grafik: Reishauer*

Polierschleifen können die Geräuschanregung im Vergleich zum konventionellen Schleifprozess deutlich reduzieren. Durch die reduzierte Geräuschanregung aus der Oberflächenrauheit können Geräuschanregungen nicht betriebspunktoptimaler Flankenmodifikationen verstärkt hervortreten.

Lösung spezifischer NVH-Probleme

Die Lösung von NVH-Problemen ist insbesondere bei der Ursachenforschung oft ein iterativer Prozess. Die Grundlage bildet der Schleifprozess, der mit dem „Argus“-System von Reishauer überwacht werden kann. Aus der laufenden Produktion werden Teile ausgeschleust, an denen eine taktile Messung durchgeführt wird. Dies dient dazu, geometrische Abweichungen zu bestimmen und die gleichbleibende Qualität der gefertigten Zahnräder sicherzustellen. Die Qualitätskontrolle in Form einer taktilen Messung wird in der Regel aufgrund der langen Messzeiten und der Kosten nur stichprobenartig durchgeführt.

Der End-of-Line-Prüfstand liefert die am besten geeigneten Daten zur Bewertung des Anregungsverhaltens des Zahnrads im Antriebsstrang, da es sich um eine direkte Messung des Geräuschpegels handelt, der einschließlich aller Wechselwirkungen innerhalb des Antriebsstrangs erfasst wird. Der Nachteil dieser Prüfmethode ist die kostenintensive und zeitaufwendige Umsetzung.

Einsatz von Simulation und Prozessmonitoring

Um diese Nachteile zu umgehen, ist die Nutzung einer Simulation des Schleifprozesses unter Berücksichtigung aller Prozessparameter sowie der Geometriedaten von Werkstück und Schleifschnecke hilfreich. Damit lässt sich eine Korrelation zwischen dem NVH-Problem und dem Produktionsprozess herstellen. Diese Simulation erlaubt es, den Prozess virtuell nachzubilden und die Auswirkung von Schwingungen in der Schleifmaschine auf die Oberflächenstruktur des Werkstücks zu verstehen.

Die Prozessüberwachung von Reishauer spielt dabei eine zentrale Rolle im Lösungsfindungsprozess [3]. Ziel von Argus ist es, potenziell geräuschkritische Werkstücke bereits im Schleifprozess zu erkennen, bevor sie in der taktilen Messung oder im End-of-Line-Test erfasst werden. Diese präventive Strategie spart Zeit und Geld, ohne dass eine Vielzahl von NIO-Teilen produziert wird oder gar Rückbaukosten für das fertig montierte Getriebe anfallen.

Wenn ein NVH-Problem auftritt, ist Argus ein effizientes Werkzeug, das detaillierte Daten zum Schleifprozess liefert und mit dem Komponentenüberwachungsmodul auch dabei hilft, maschinenbezogene Ursachen zu identifizieren. Die Kombination dieser Werkzeuge und Methoden ist entscheidend, um Unregelmäßigkeiten im Prozess in Bezug auf das Anregungsverhalten eines Zahnrads zu erkennen und zu beheben.

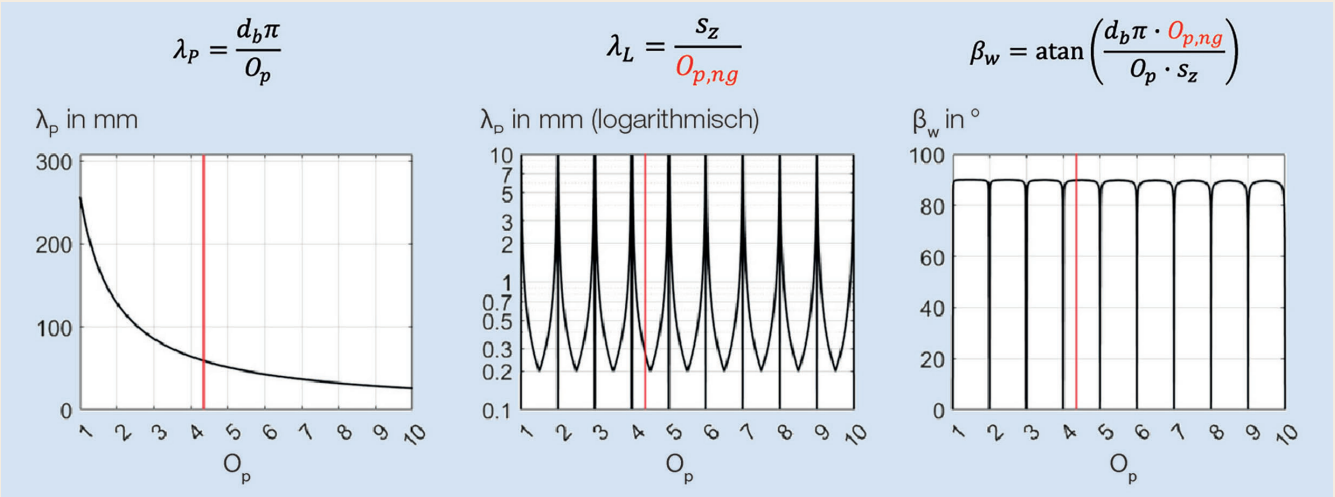

Bild 3. Parameter der Oberflächenwelligkeit in Abhängigkeit der Ordnung in Profilrichtung. *Grafik: Reishauer*

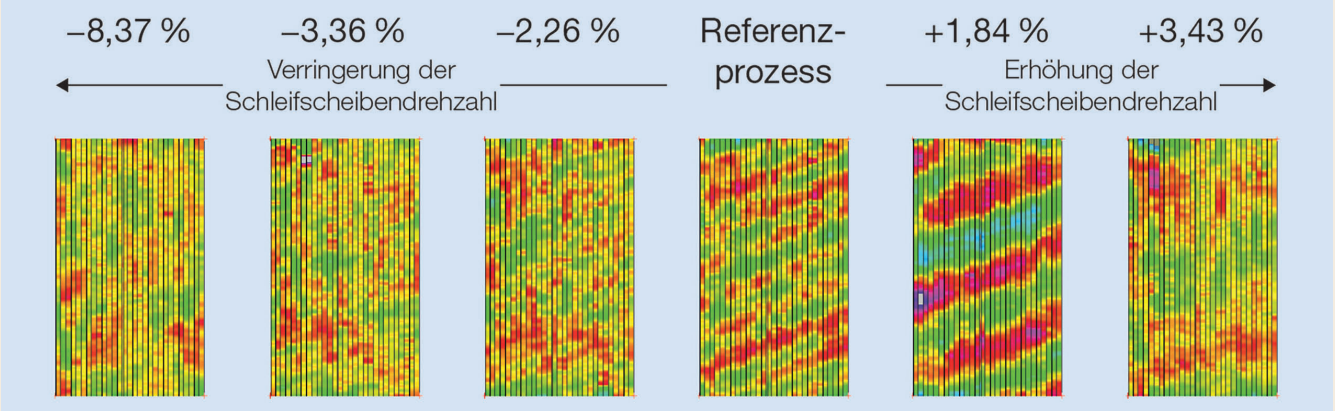

Bild 4. Praxisbeispiel für Welligkeiten auf der Zahnflanke, beeinflusst durch vom Referenzprozess abweichende Schleifschneckendrehzahlen bei externer Anregung. *Grafik: Reishauer*

Untersuchung zu externer Störanregung

Im kontinuierlichen Wälzschleifprozess ist es möglich, dass Schwingungen auftreten. In diesen Fällen können Störordnungen, auch bekannt als „Geisterordnungen", beim Schleifen eines Werkstücks auf der Zahnflanke entstehen. Die Ursachenforschung gestaltet sich aufgrund der großen Anzahl möglicher Ursachen in der Regel als eine komplexe Aufgabe. Eine Ursache für Schwingungen im Schleifprozess stellen externe Störanregungen dar, die typischerweise in einer vom Schleifprozess unabhängigen Frequenz auftreten.

Zur Analyse der wichtigsten Einflussfaktoren wird zunächst ein Beispielprozess definiert. Die folgenden Berechnungen werden mit einem Stirnrad mit 29 Zähnen und einem Modul von 3 mm durchgeführt, das mit einer viergängigen Schleifschnecke geschliffen wird. Die Drehzahl der Schleifschnecke beträgt 5000 min^{-1}, was bei dem gegebenen Übersetzungsverhältnis zu einer Werkstückdrehzahl von etwa 690 min^{-1} führt. Die Drehfrequenz des Werkstücks ist hierbei circa 11,5 Hz. Der Axialvorschub wird auf s_z = 0,1 mm / mm Hub festgelegt. Bei einer externen Anregungsfrequenz von 50 Hz ergibt sich damit die Ordnung in Profilrichtung O_p = 4,35 in Bezug auf eine Umdrehung des Werkstücks (vgl. Formel 1). Die Wellenlänge der resultierenden Zahnflankenwelligkeit in Profilrichtung λ_P sowie in Flankenlinienrichtung λ_L und der Winkel der Welligkeit β_w sind in **Bild 3** dargestellt.

Da sich der nicht-ganzzahligen Anteil der Profilordnung $O_{p,ng}$ periodisch mit zunehmender Anregungsordnung verhält, zeigt die Wellenlänge in Flankenlinienrichtung λ_L ebenfalls ein periodisches Verhalten. Im Gegensatz zur Wellenlänge in Profilrichtung λ_P reagiert die Wellenlänge in Flankenlinienrichtung λ_L sehr sensitiv in Bezug auf die Ordnung in Profilrichtung. Das bedeutet, dass eine kleine Variation der Profilordnung eine große Änderung der Wellenlänge in Flankenlinienrichtung bewirkt. Diese hohe Sensitivität tritt ebenfalls beim Winkel der Welligkeit β_w in der Nähe der ganzzahligen Profilordnungen auf.

Die Profilordnung O_p hängt sowohl von der externen Frequenz f_{ext} als auch von der Drehfrequenz des Werkstücks f_{wp} ab:

$$O_p = f_{ext} / f_{wp} \qquad (1)$$

Die externe Störfrequenz ist, da nicht beabsichtigt, nicht beeinflussbar. Daher besteht nur die Möglichkeit, die Profilordnung O_p indirekt über die Drehzahl der Schleifschnecke n_{GW} zu beeinflussen.

Der resultierende Effekt kann anhand eines praktischen Beispiels demonstriert werden, bei dem eine Welligkeit durch eine externe Störanregung vorliegt. Die gemessene Topografie zeigt im Ausgangszustand eine zweidimensionale Welligkeit auf der Werkstückzahnflanke, **Bild 4**. Eine Variation der Drehzahl der Schleifschnecke, bei sonst unveränderten Prozessparametern, führt zu einer signifikanten Veränderung von Amplitude und Welligkeitsmuster. Das beste Ergebnis konnte mit einer Reduktion der Schleifschneckendrehzahl um – 3,36 % im Vergleich zum Referenzprozess erzielt werden. Mithilfe von Simulationsmodellen kann der Einfluss der Änderung der Schleifschneckendrehzahl auf die Werkstückoberfläche vorausberechnet werden, sodass eine gezielte Nutzung des Effektes zur Unterdrückung von Welligkeiten aus externer Störanregung möglich ist. ■

www.reishauer.com

EMO: Halle 13, Stand D42

LITERATUR

[1] Kahnenbley, T.: Causes for waviness on cylindrical gears is avoidance. PhD-thesis, University of Hamburg, 2020.

[2] Reishauer AG, Continuous Generating Grinding, 1. Release, ISBN 978-3-033-01447-3

[3] Graf, W., Dietz, C.: Making Gear Grinding Transparent. Gear Technology, May 2022, pp.30–32.

Dr. **Maximilian Zimmer** ist CTO bei der Reishauer AG im schweizerischen Wallisellen bei Zürich.

Christoph Leonhardt ist als Fachbereichsleiter Technologie für Reishauer tätig.

© VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2025