Dem Geräusch auf der Spur – Welligkeiten auf Zahnflanken und ihre Ursachen

Vortragender:
Prof. Dr.-Ing. Günther Gravel
HAW Hamburg / Institut für Produktionstechnik

Weitere Autoren:
M. Sc. Thies Kahnenbley
HAW Hamburg / Institut für Produktionstechnik

Abstract

Geringe Geräusche im Innenraum sind ein wichtiges Qualitätskriterium für Pkw. Bei immer leiser werdenden Motoren und insbesondere dem weiteren Einsatz der E-Antriebe geraten Geräusche verursacht durch Getriebe zunehmend in den Focus. Werden durch Vergleich der Geräuschordnungen und Tauschversuche Zahnräder als Ursache ermittelt, so können sie geometrisch sehr genau vermessen werden. Häufig findet sich dann auf den Oberflächen der Zähne eine Welligkeit, deren Ordnung einen Zusammenhang mit der Geräuschordnung aufweist.

Heute sind Auswertemethoden verfügbar, die es erlauben, diese Welligkeiten sicher und reproduzierbar zu bestimmen und mit Toleranzvorgaben zu vergleichen. Mit etwas mehr Aufwand kann auch der Schrägungswinkel der Welligkeit erfasst werden, unter dem sich die Struktur auf der Oberfläche ausprägt. Dieser Winkel kann Hinweise auf die Wirkung und die Ursachen der Welligkeit geben.

Sind geräuschverursachende Welligkeiten auf der Verzahnungsoberfläche nachweisbar, so sind in einem nächsten Schritt die Ursachen der Entstehung dieser Welligkeiten zu ermitteln, um sie zu beseitigen. Entsprechend den vielfältigen Einflussgrößen und Wechselwirkungen ist die Ursachensuche sehr komplex und führt oft nicht auf wirtschaftlich optimale und dauerhafte Lösungen. Von einem funktionierenden Qualitätsregelkreis kann daher keine Rede sein.

Der Beitrag zeigt an praktischen Beispielen auf, wie sich die Welligkeit auf Verzahnungsoberflächen in der Produktion einfach bestimmen lässt. Detailliert wird der Schrägungswinkel der Welligkeit betrachtet. Für die Ursachensuche bietet sich die Nutzung von Simulationswerkzeugen an. Einerseits können damit verschiedene Welligkeiten erzeugt und überlagert werden, damit der Anwender veränderliche Oberflächenstrukturen von Zahn zu Zahn leichter versteht. Andererseits erlauben neu entwickelte Softwaretools die Simulation typischer Werkzeug- und Prozessabweichungen. Anhand von Beispielen aus der Praxis wird aufgezeigt, wie diese Abweichungen geräuschanregende Welligkeiten erzeugen können und welche Wechselwirkungen z.B. mit dem Axialvorschub bestehen. Hier ist auch der Vorbearbeitungsprozess als wichtige Einflussgröße zu betrachten.

Zusammenfassend stellt der Beitrag die praxisnahe Bestimmung geräuschkritischer Welligkeiten dar und zeigt an Beispielen erste Schritte zur Ursachensuche auf. In einem komplexen Szenario von Wirkzusammenhängen können damit erste Lösungen und Einstellparameter zur Prozessverbesserung gefunden werden

1. Einleitung

Geringe Geräusche im Innenraum sind ein wichtiges und zunehmend stärker beachtetes Qualitätskriterium für Pkw. Bei immer leiser werdenden Motoren und insbesondere dem weiteren Einsatz der E-Antriebe geraten Geräusche verursacht durch Getriebe zunehmend in den Focus [1],[2]. Dies gilt nicht nur für das Getriebe im Hauptantriebsstrang, sondern auch für Hilfsantriebe wie z.B. in der Sitzverstellung. Die konsequente Leichtbauoptimierung zur Kraftstoffeinsparung reduziert häufig die Dämpfungseigenschaften des Systems und fördert die Weiterleitung von Schwingungen und Körperschall. Daher ist es für den Getriebehersteller wichtig, die Geräuschentstehung und –weiterleitung als Ursache-Wirkungs-Kette zu kontrollieren.

Bild 1 illustriert eine typische Vorgehensweise bei Geräuschproblemen an Verzahnungen. Ausgehend von einem lauten Getriebe, das entweder subjektiv oder durch die Messung von Luft- oder Körperschall detektiert wurde, erfolgt eine Geräuschprüfung, bei der die verschiedenen Gänge unter Last hochgefahren werden und eine kontinuierliche Geräuschmessung vorgenommen wird. Die Ergebnisse sind farbcodiert in Wasserfall-Diagrammen dargestellt und erlauben dem Akustiker Rückschlüsse auf geräuschverursachende Komponenten [1]. In der Automobilindustrie ist diese Geräuschprüfung als End-Of-Line (EOL)-Prüfung üblich.

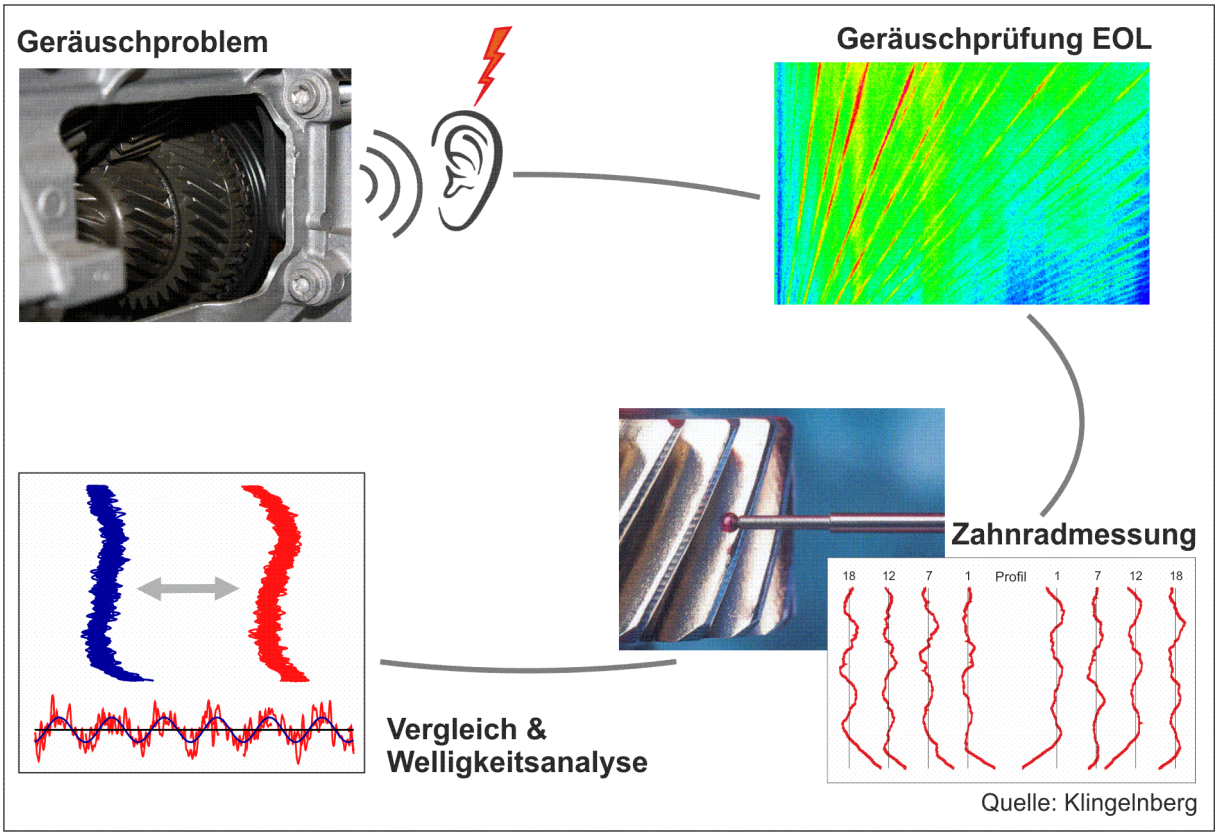


Bild 1: Analyse von Geräuschproblemen.

Wird ein Zahnrad als Fehlerquelle vermutet, so erfolgt häufig ein Austausch und eine neuerliche Geräuschmessung. Um die Geräuschursache an dem lauten Zahnrad oder Zahnradpaar zu ermitteln, werden laute und leise Bauteile auf hochgenauen Zahnradmessgeräten vermessen. Die Ergebnisse müssen anschließend analysiert werden, um Korrekturmaßnahmen im Fertigungsprozess einzuleiten. Diese Analyse soll im Weiteren erläutert werden.

2. Grafische Beurteilung von Abweichungskurven

Üblicherweise erfolgt zunächst der Vergleich der Kennwerte der Verzahnungsmessgrößen, wie sie in den Normen und Richtlinien definiert sind [3],[4]. Lassen sich hier keine eindeutigen Differenzen erkennen, so erfolgt oft ein grafischer Vergleich der Abweichungskurven. Früher wurde dies durch das Übereinanderlegen der Messblätter erreicht, wie Bild 2 links oben zeigt. Heute können die Messkurven viel einfacher und besser in digitaler Weise gemeinsam dargestellt und verglichen werden.

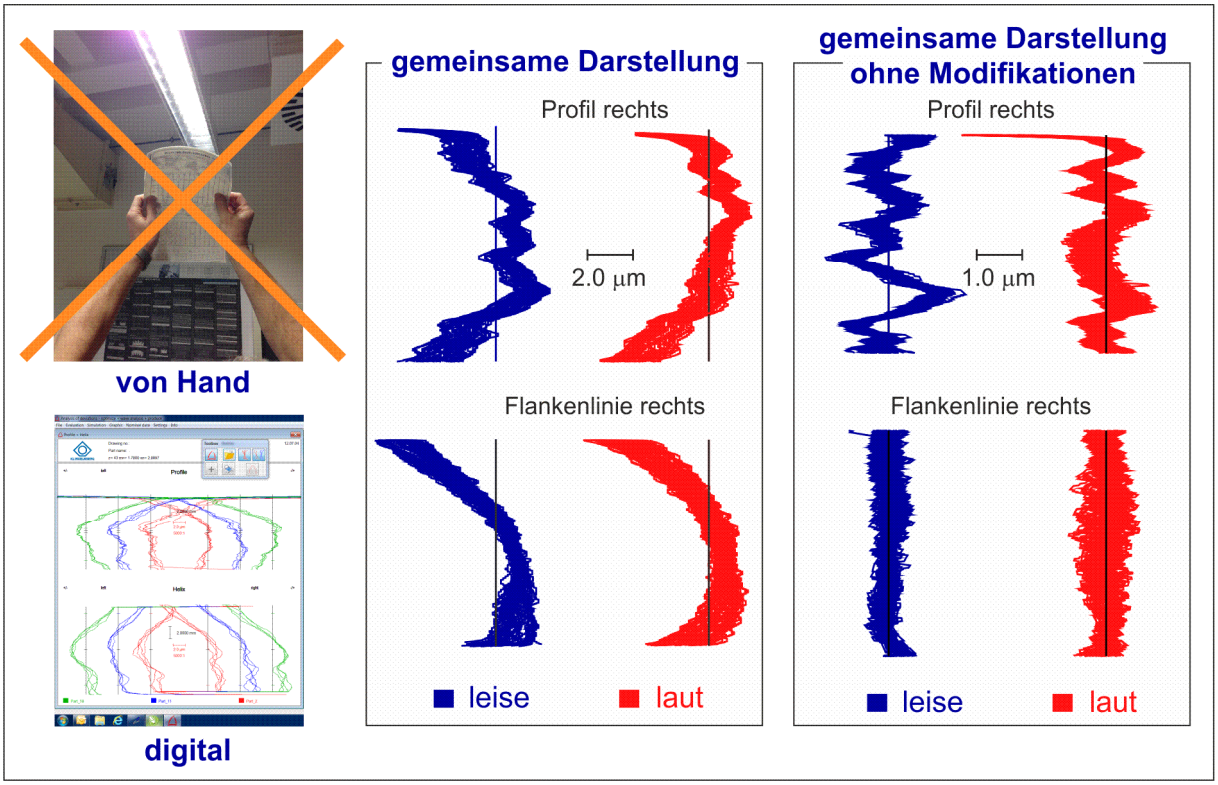


Bild 2: Vergleich von Messungen

Die übereinandergelegten Abweichungskurven aller Zähne einer lauten und einer leisen geschliffenen Verzahnung für das Evolventenprofil und die Flankenlinie der rechten Flanken sind in Bild 2 Mitte dargestellt. Im Profil sind Differenzen zwischen laut und leise erkennbar, allerdings erlauben der Sollwert der Balligkeit und die Schwankung der Ist-Modifikationen der Flanke in Form von Balligkeit und Winkelabweichung keine weitere Vergrößerung der Kurven. Werden diese Ist-Modifikationen jeder Kurve eliminiert, so wird im rechten Teil des Bildes bei erhöhter Vergrößerung deutlich, dass das leise Bauteil eine große systematische Formabweichung im Profil aufweist, die Kurven der lauten Verzahnung dagegen in Profil und Flankenlinie etwas stärker streuen. Die laute Verzahnung mit einer Zähnezahl von 47 weist auf dem EOL-Prüfstand eine deutliche Geräuschauffälligkeit in der Geisterordnung 57 auf. Ein Zusammenhang zu diesem realen Geräuschverhalten der Verzahnungen ist in den Abweichungskurven nicht erkennbar.

3. Welligkeitsanalyse

Da Geräusche durch Schwingungen erzeugt werden und die laute Verzahnung eindeutig als Geräuschursache identifiziert wurde, ist es naheliegend, nach periodischen Oberflächenstrukturen zu suchen, die beim Abwälzen solche Schwingungen erzeugen können. Es ist nun nicht sinnvoll, für jeden Zahn ein eigenes Spektrum von Welligkeiten zu berechnen. Günstig ist es, alle gemessenen Kurven zu einer Kurve über dem Umfang zu verdichten und daraus dann das Spektrum einer umlaufenden Welligkeit zu berechnen [5].

Bild 3 verdeutlicht diese Vorgehensweise. Für jeden Messpunkt auf der Verzahnung lässt sich ein Drehwinkel bestimmen, wie er beim Abrollen mit einem Gegenrad wirksam ist. Dieser berechnet sich aus dem Wälzwinkel, dem Teilungswinkel und der Steigung in Achsrichtung.

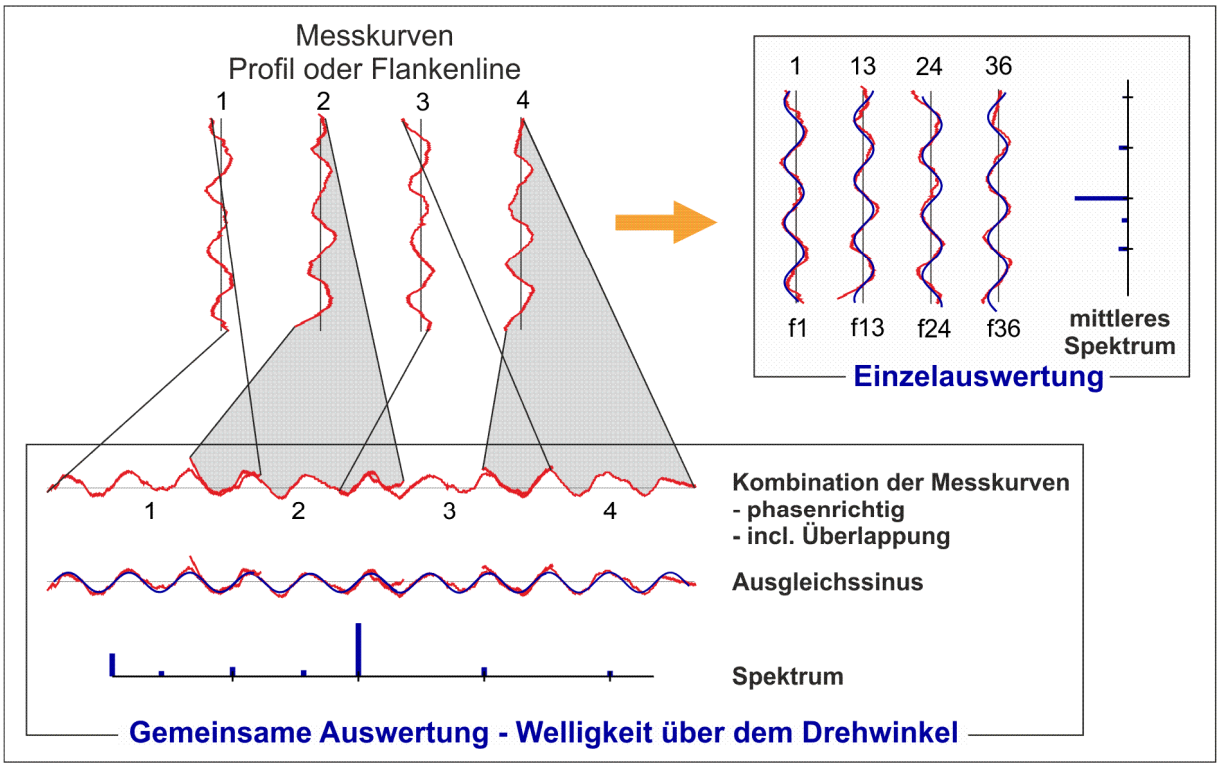


Bild 3: Methoden der Welligkeitsauswertung

Werden nun alle Abweichungen über dem Drehwinkel aufgetragen so ergibt sich eine geschlossene Kurve aller Zähne auf einer Umdrehung. Im Bild links ist zu erkennen, dass sich die Kurven entsprechend der Überdeckung und dem Auswertebereich mehr oder weniger überlappen können. Zur Beschreibung von periodischen Signalen haben sich Ausgleichs-Sinusfunktionen bewährt [5]. Gegenüber einer in der Signalverarbeitung häufig benutzten FFT haben sie den Vorteil, auch offene Kurven und solche mit Überlappungen und Lücken exakt zu beschreiben. Aus den gemessenen Kurven über dem Drehwinkel werden nun Schritt für Schritt die Sinusfunktionen mit der größten Amplitude berechnet und zu einem Spektrum verdichtet. Die Ordnungen dieses Spektrums können direkt mit den auf das Zahnrad bezogenen Geräuschordnungen verglichen werden.

Werden nicht alle Zähne der Verzahnung gemessen, sondern die üblichen 4 gleichmäßig verteilten Zähne, so weist die Abweichungskurve über dem Umfang erhebliche Lücken auf. Ein daraus berechnetes Spektrum reagiert stark auf Formabweichungen und weist z.B. die Ordnung 4 und Vielfache davon auf. Dieses Verfahren ist bei den 4 Zähnen einer Standardmessung nicht brauchbar. Eine gute Lösung für die Welligkeitsberechnung an wenigen Zähnen stellt Bild 3 rechts dar. Für jede Einzelkurve wird ein Spektrum berechnet und diese Spektren werden zu einem mittleren Spektrum verdichtet und auf den Umfang hochgerechnet. Diese Art der Auswertung kann durch die Einzelauswertung allerdings nicht die Phasenlage der Abweichungskurven zueinander berücksichtigen. Weist das reale Bauteil eine Welligkeit auf, die z.B. von Zahn zu Zahn genau gegenphasig verläuft, wird in der gemeinsamen Auswertung keine wirksame Ordnung berechnet, da die Kurven sich auslöschen. In der Einzelauswertung erscheint dagegen die Ordnung der Einzelkurven.

In Bild 4 sind links die Ergebnisse der Welligkeitsauswertung der Verzahnung aus Bild 2 als Spektren dargestellt. Die laute Verzahnung weist sowohl im Profil als auch in der Flankenlinie die gesuchte Geräuschordnung 57 als dominante Welligkeit auf. Rechts im Bild zeigt ein Ausschnitt aus dem Verlauf der Kurven, wie gut die Kurven zueinander passen. Die leise Verzahnung weist im Profil eine hohe Amplitude in der Zahneingriffsordnung und ihrer Vielfachen auf. Verursacht ist diese durch die schon in Bild 2 deutlich erkennbare systematische Formabweichung im Profil. Die Zahneingriffsordnungen und Vielfache finden sich auch in geringerer Amplitude an der lauten Verzahnung. Unter Umständen können auch diese Ordnungen geräuschverursachend sein. Schließlich weist die Flankenlinie eine hochfrequente Ordnung 442 auf, die in der Regel nicht geräuschrelevant ist und die direkt oder indirekt vom Axialvorschub erzeugt wird.

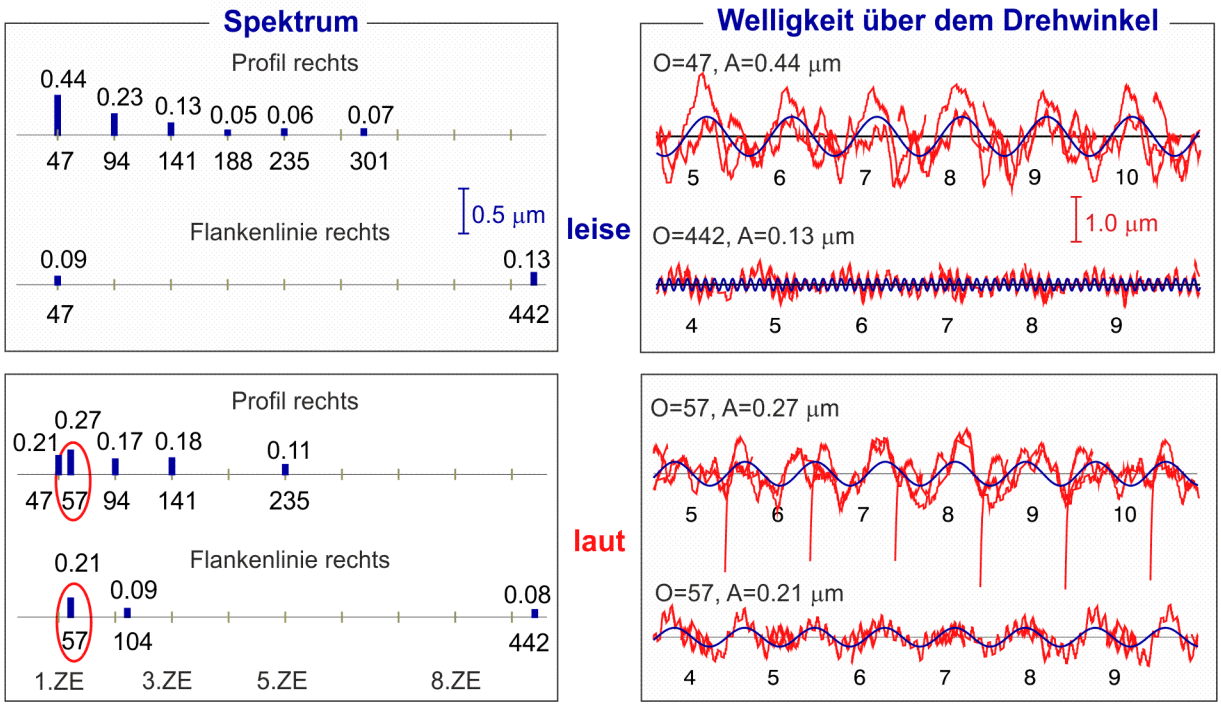


Bild 4: Welligkeitsanalyse an 2 geschliffenen Zahnrädern

In der Praxis zeigt sich, dass es oft eine gute Korrelation zwischen der Geräuschmessung und der Welligkeitsanalyse gibt. Das vorgestellte Beispiel macht aber auch deutlich, dass ein offensichtlich schlechteres und periodisches Profil am leisen Rad nicht geräuschverursachend sein muss, sondern hier eine im grafischen Vergleich in Bild 2 kaum erkennbare Welligkeit am lauten Rad geräuschverursachend ist. Ein Rückschluss ausgehend von Welligkeitsordnung und Amplitude auf ein Geräuschverhalten im Getriebe ist daher meist nur zielführend, wenn die kritischen Geräuschordnungen konkret oder allgemein für das Getriebe bekannt sind.

4. Die Richtung der Welligkeit

Für die vertiefte Untersuchung von Welligkeiten auf Zahnflanken im Hinblick auf Ursache und Wirkung ist die Messung von vielen Schnitten auf einzelnen Zahnflanken hilfreich. In Form einer Topografiedarstellung können die Abweichungen farbcodiert über Zahnbreite und Wälzweg aufgetragen werden, Bild 5 links. Eingezeichnet ist hier sowohl der Istwert des Schrägungswinkels $ß_w$ als auch der Grundschrägungswinkel $ß_b$. $ß_w$ berechnet sich für jede Ordnung aus der Phasenverschiebung der Welligkeiten in den einzelnen Schnitten. Jede Ordnung kann also einen anderen Schrägungswinkel aufweisen. Während des Abwälzens mit dem Gegenrad wandert die um $ß_b$ geneigte Kontaktlinie über die Zahnflanke. Es kann angenommen werden, dass Welligkeiten, die einen Schrägungswinkel ähnlich $ß_b$ aufweisen, besonders geräuschanregend sind, da die Kontaktlinie sich beim Abwälzen dann durch Berg und Tal bewegt [2].

Rechts im Bild 5 sind die Topografien der betrachteten leisen und lauten Verzahnung gegenübergestellt. Die Ordnung 57 der lauten Verzahnung weist einen Schrägungswinkels $ß_w$ auf, der dem Grundschrägungswinkel entspricht. Die dominante Ordnung 47 der leisen Verzahnung weist einen Schrägungswinkel von annähernd 0° auf. Diese Ordnung taucht daher im Spektrum der Flankenlinie nicht auf. Die Vielfachen der Zahneingriffsordnungen deuten sich bei beiden Rädern in der Topografie in Form von Welligkeiten mit kürzeren Wellenlängen unter einem Schrägungswinkel $ß_w$=0° an. Die zur Berechnung und Darstellung verwendete Software ‚Welligkeitsanalyse' erlaubt es hier, per Klick von Welligkeit zu Welligkeit zu navigieren.

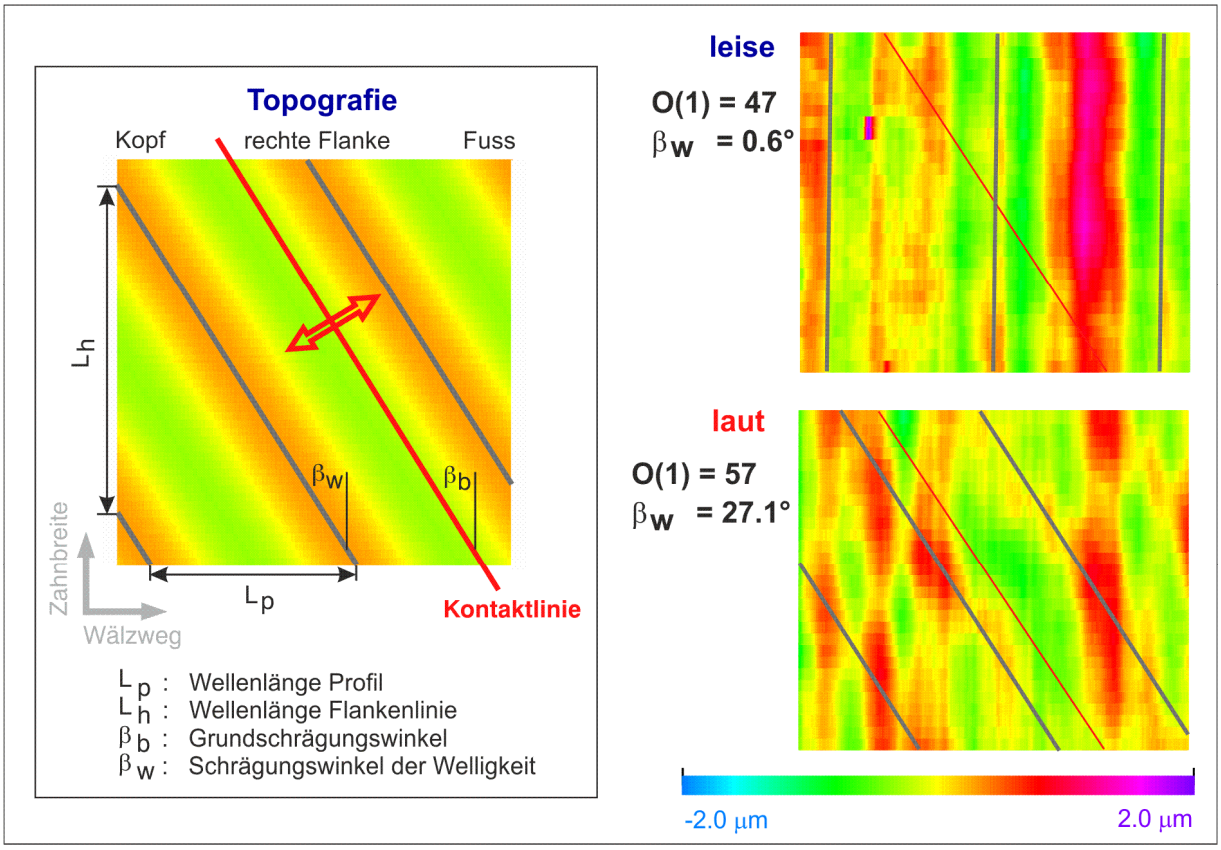


Bild 5: Topografiedarstellung und Schrägungswinkel der Welligkeit

In Bild 6 sind zusammenfassend die heute üblichen Verfahren der Welligkeitsauswertung zusammengestellt. Das Standardverfahren basiert auf der Messung aller Zähne und erlaubt die gemeinsame Auswertung über dem Drehwinkel. Dieses Verfahren sollte angewendet werden, wenn wenig Erfahrungen mit der aktuellen Verzahnung im Hinblick auf Geräuschanregung vorliegen und eine exakte Korrelation zwischen einer Geräuschordnung und Welligkeitsordnung gesucht wird. Die Messung kann ergänzt werden durch die aufwändigere Messung mehrerer oder vieler Schnitte. Dann ist die Berechnung des Schrägungswinkels der Welligkeit möglich. Dieser gibt Hinweise auf die Wirkung der Welligkeit beim Abwälzen. Auch die Entstehung der Welligkeit spiegelt sich u.U. im Schrägungswinkel wieder. Dies ist Gegenstand aktueller und zukünftiger Untersuchungen.

Für eine serienbegleitende Beurteilung der Welligkeit auf Verzahnungsoberflächen kann die Einzelauswertung genutzt werden. Diese basiert auf der Standardmessung von 4 Zähnen. Sie erfolgt automatisch nach jeder Messung und erfordert damit nur den Aufwand einer einmaligen Einrichtung. Die Ergebnisse können als PDF abgelegt, in der Datenbank der Software QS-Stat oder in Tabellenform gespeichert werden. Über eine Datenbankauswertung ist die Untersuchung einer Korrelation der Welligkeitsausprägung mit Parameteränderungen an der Werkzeugmaschine möglich.

Werden die Ergebnisse der Welligkeitsanalyse direkt dem Maschinenbediener übermittelt, kann er diese mit dem Maschinenverhalten oder Parametern wie dem Abrichtzyklus in Verbindung bringen. Darüber hinaus ist es bei bekannten Problemen möglich, im Spektrum Toleranz- und Eingriffskurven zu definieren, um frühzeitig Qualitätsprobleme zu verhindern. Letztlich ist diese Art der Auswertung aber unschärfer, da bei der Berechnung des mittleren Spektrums die Phasenlage nicht berücksichtigt werden kann (siehe Kapitel 3). Durch die kleinere Datenbasis gehen Formabweichungen stärker ein. Für eine erfolgreiche Nutzung dieser Auswertemethode zur Fertigungsüberwachung ist es daher sinnvoll, erst Erfahrungen zur Geräuschrelevanz der real auftretenden Welligkeiten zu sammeln.

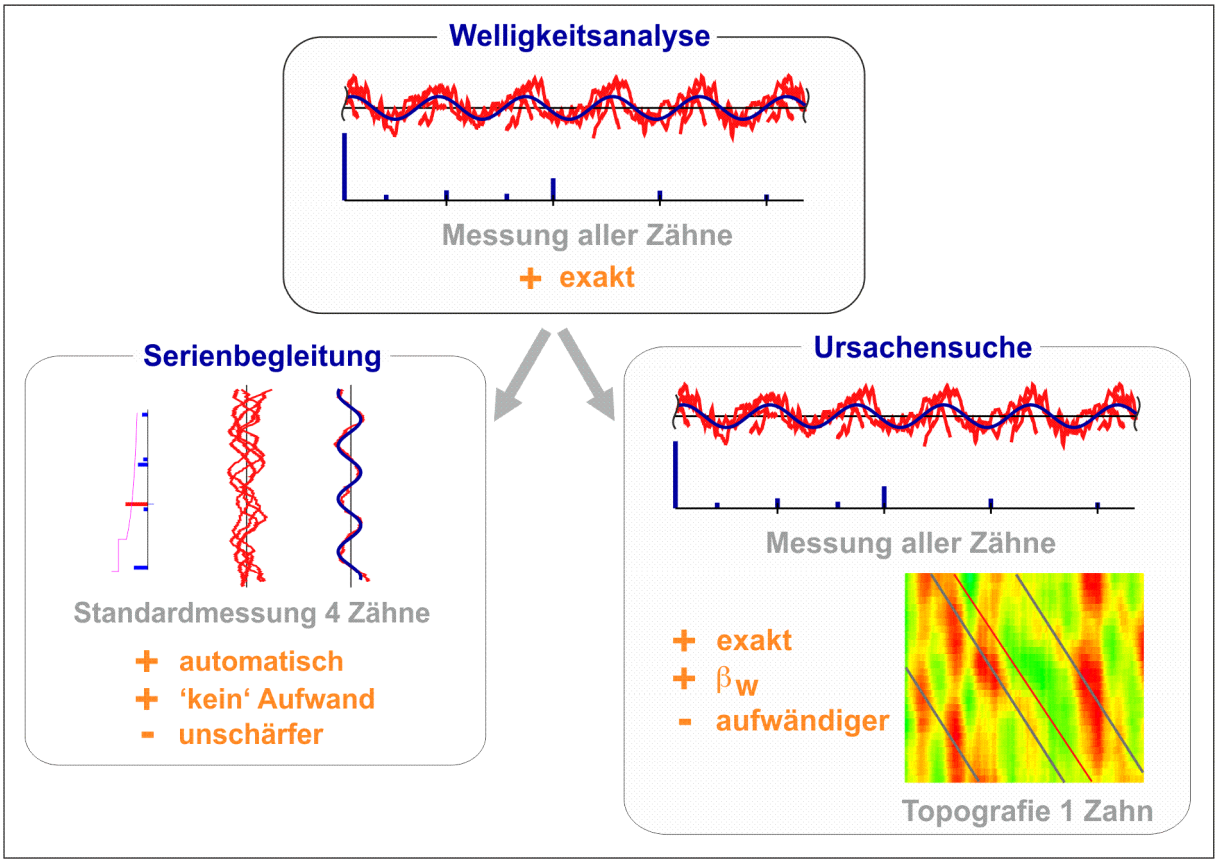


Bild 6: Methoden der Welligkeitsanalyse in der Praxis

5. Ursachensuche

Kann ein Geräusch eindeutig dem Zahnrad zugeordnet werden und entspricht die Welligkeit auf den Zahnflanken der Geräuschordnung, so folgt im nächsten Schritt die oft aufwändige Suche nach den Entstehungsursachen. In Bild 7 sind einige Ursachen von Welligkeiten dargestellt, wie sie in [1] und [2] genannt werden. Das Werkstück kann zur Entstehung von Welligkeiten beitragen, wenn die Steifigkeit der Aufspannung zu gering ist. Dadurch kann es den sich ändernden Bearbeitungskräften mehr oder weniger ausweichen. Große und periodische Abweichungen aus der Vorbearbeitung können den Fertigbearbeitungsprozess anregen und schließlich wirken sich alle Fehler des Werkzeugs im Verhältnis der Zähnezahlen von Werkzeug und Werkstück aus. Das Werkzeug kann durch Unwucht, Spann- oder Abrichtabweichungen einen Taumel und einen Exzenter aufweisen, durch den Abrichtprozess können sich Unterschiede in den Gängen ergeben und auch das Werkzeug kann sich durch verändernde Bearbeitungskräfte verformen. Entsprechend dem Werkzeugverschleiß und der Stückzahl nach dem Abrichten beeinflusst die Schärfe die Schnittkräfte und die entstehende Oberfläche. Schließlich übertragen sich die Abweichungen in Abhängigkeit vom Axialvorschub auf die Oberfläche, wie im Folgenden noch weiter beschrieben wird.

Schwingungen in der Werkzeugmaschine können durch eine Abweichung der Ausrichtung der Gegenhalterspitze zur Drehachse entstehen. In ähnlicher Weise wirken Lagerschäden an Spindel und Gegenhalter, defekte Achsen oder eine Zahnriemenscheibe mit einem Rundlauffehler. Die Maschine besitzt Eigenfrequenzen in denen sie bei Anregung empfindlich reagiert. Schließlich kann der Drehtisch durch die Regelung oder die Bearbeitungskräfte Torsionsschwingungen ausbilden und auch die Polpaarzahl des Antriebsmotors kann sich in Oberwellen abbilden. Die Ursachensuche wird erschwert, wenn Einflüsse eine Wechselwirkung aufweisen und sich verstärken. Ein stumpfes Werkzeug erzeugt z.B. höhere Bearbeitungskräfte und damit höhere Anregungen.

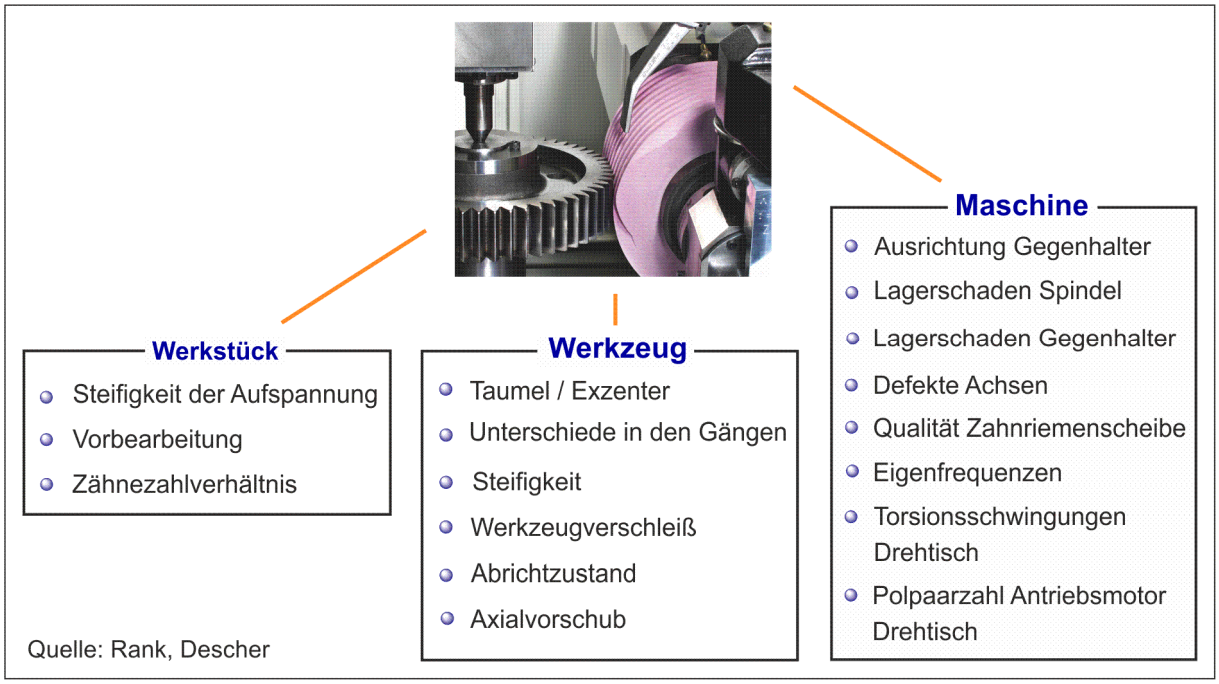


Bild 7: Ursachen von Welligkeiten auf Verzahnungen

Durch die komplexe Kinematik der abwälzenden Fertigung und insbesondere die heute übliche Verwendung von mehrgängigen Werkzeugen ist das Zusammenspiel von Werkzeug und Werkstück bei Fehlern auch für Fachleute kaum noch zu verstehen. Daher wurden viele Simulationswerkzeuge entwickelt, die Kräfte, Werkzeugverschleiß, Anregungen und auch die Wirkung von Fehlern berechnen können [6],[7],[8]. Damit ist es möglich, Prozesse auszulegen und zu optimieren [9].

Für die Suche nach den Ursachen der Welligkeit wurde hier ein neu entwickeltes Softwaretool [10] zur Simulation des Wälzfräsens und Wälzschleifens benutzt, das sich durch Geschwindigkeit und hohe Berechnungsgenauigkeit auszeichnet. Die Software erlaubt es, typische Fehler an Werkzeug und Maschine zu simulieren und die Ergebnisse wie Messungen darzustellen, zu vergleichen und auch eine Welligkeitsauswertung vorzunehmen. An der zu Beginn vorgestellten lauten Verzahnung wird die Herstellung mit einer 5-gängigen Schleifschnecke simuliert. Zusätzlich führt das Werkzeug eine taumelnde Bewegung durch, beschrieben durch einen Rundlauf von 2 µm am Hauptlager des Werkzeugantriebs. Dadurch schneiden einige Werkzeugbereiche stärker, da sie vorstehen, andere Bereiche weniger oder gar nicht. Weiterhin wird in der Untersuchung der Axialvorschub der Bearbeitung verändert, da dieser die Wirkung des Werkzeugtaumels deutlich verändern kann.

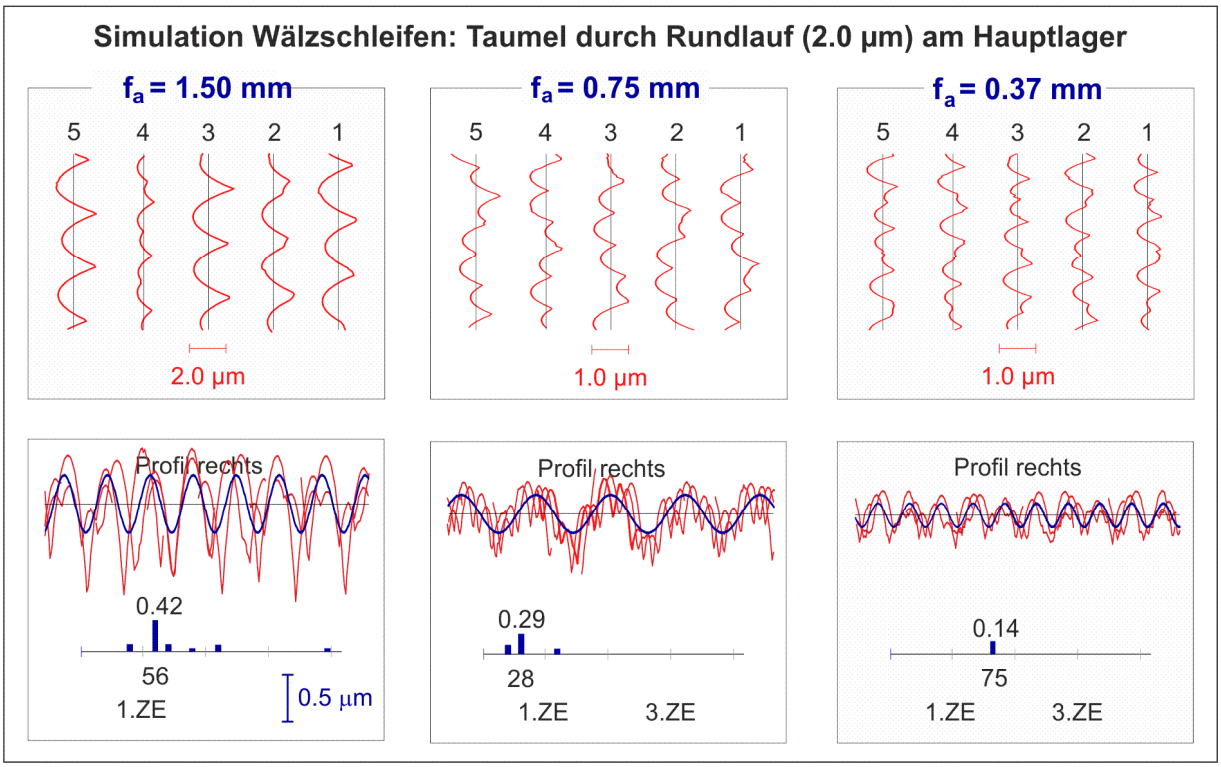


Bild 8: Welligkeitsauswertung - Wechselwirkung Taumel – Axialvorschub

In Bild 8 sind die berechneten Profilabweichungen von 5 aufeinanderfolgenden Zähnen dargestellt. Ein Axialvorschub von 1.5 mm pro Werkstückumdrehung erzeugt in der gemeinsamen Welligkeitsauswertung eine Ordnung 56. Diese passt sehr gut zur Geräuschordnung 57 der lauten Verzahnung. Wird der Axialvorschub halbiert, so entsteht ein anderes Fehlermuster im Profil und eine dominante Ordnung 28 in der Welligkeit. Bei weiterer Verkleinerung des Axialvorschubes ergibt sich eine Ordnung 75. Deutlich wird, dass es eine gemeinsame Wirkung von Fehlergröße am Werkzeug und dem Axialvorschub gibt, die sich in veränderlichen Ordnungen der Welligkeit äußert.

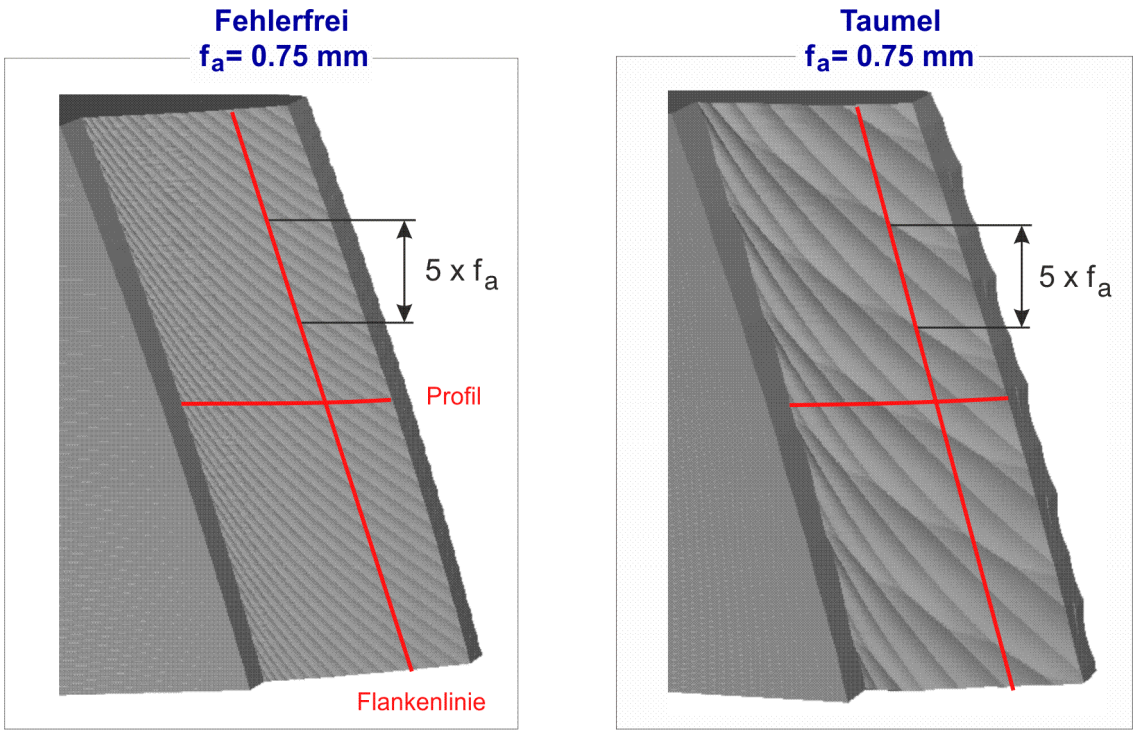


Bild 9: 3D - Oberfläche

Für eine genauere Betrachtung der Zusammenhänge ist in Bild 9 die überhöhte 3D-Oberfläche eines Zahnes dargestellt, die sich bei einem Axialvorschub von 0.75 mm/U ergibt. Bei fehlerfreier Bearbeitung links im Bild ergeben sich in der Flankenlinie nach 5 Umdrehungen auch 5 Wellen, da das Werkzeug 5 mal an der Linie vorbeikommt. Taumelt das Werkzeug, so ergibt sich rechts im Bild bei gleichem Axialvorschub ein ganz anderes Muster. Auffällig ist, dass dieses Muster sich in Richtung der Flankenlinie erst nach 5 Umdrehungen wiederholt. Da die Zähnezahl des Werkstücks (47) und die Gangzahl des Werkzeugs (5) keinen gemeinsamen Teiler aufweisen, steht das Werkzeug erst nach 5 Umdrehungen wieder an der gleichen Position. Durch den Taumel schneiden in der Endgeometrie nur einige vorstehende und einige zurückliegende Werkzeugbereiche. Die Kombination dieser beiden Effekte erzeugt so nur 2-3 Wellen unterschiedlicher Länge bei 5 Umdrehungen.

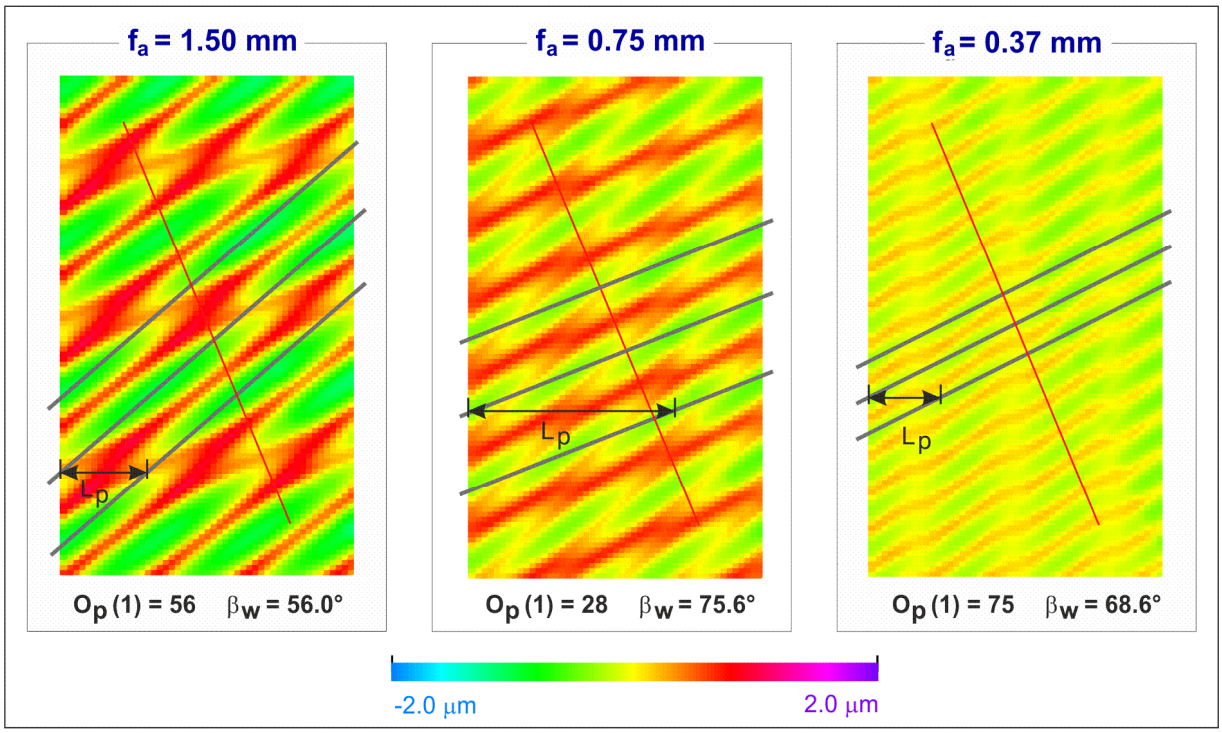


Bild 10: Topografiedarstellung

In Bild 10 ist die Topografie der Abweichungen für die 3 untersuchten Axialvorschübe dargestellt. Durch den Taumel entstehen links und in der Mitte unterschiedlich große ellipsenförmige Täler. Die Muster und auch die Schrägungswinkel der Welligkeiten unterscheiden sich deutlich. Mit kleiner werdendem Axialvorschub hinterlassen irgendwann nur noch die durch den Taumel vorstehenden Bereiche Spuren auf der Oberfläche, die zurückstehenden Bereiche werden überschnitten. Der rechte Teil des Bildes zeigt diesen Zustand. Die Wellenlänge und der Schrägungswinkel der dominanten Welligkeit sind dort kleiner.

Der Schrägungswinkel der Welligkeit liegt bei den dargestellten Topografien fast senkrecht zum Grundschrägungswinkel. Damit läuft die Kontaktlinie (siehe Bild 5) beim Abwälzen mit dem Gegenrad hier also nicht durch Berg und Tal, sondern quer zur Welligkeit nur über die Gipfel. Allerdings ist besonders links und in der Mitte des Bildes eine periodische Formänderung oder Verbreiterung der Spur über die Gipfel erkennbar. Diese Veränderung kann im Betrieb oder im Bearbeitungsprozess anregend wirken, besonders dann, wenn die Oberflächenmuster mit größerer Amplitude am vorbearbeiteten Werkstück auftreten und dann auf die Hartfeinbearbeitung einwirken.

Die Ergebnisse zeigen, dass in der Simulation der Einfluss verschiedener Parameter auf die entstehende Oberfläche untersucht werden kann. Eine Welligkeitsauswertung zeigt die Ordnungen auf, die sich aufgrund periodischer Strukturen ergeben und den Bearbeitungsprozess anregen können. Anzumerken ist hier allerdings, dass der Schneidprozess in der Simulation nur geometrisch abgebildet wird, ohne die erheblichen Einflüsse aus den Bearbeitungskräften sowie der Steifigkeit und den Eigenfrequenzen der Maschinenstruktur zu berücksichtigen. Die tatsächlich entstehenden Oberflächen können daher unter Umständen deutlich abweichen.

6. Zusammenfassung

Die Beispiele zeigen auf, wie Anwender heute durch den Einsatz moderner Softwaretools leicht Vergleiche zwischen verschiedenen Verzahnungsmessungen herstellen können. Damit lassen sich Einflüsse aus der Änderung von Prozess- oder Maschinenparametern schnell und einfach erkennen. Zur Beschreibung periodischer Strukturen können Welligkeiten berechnet werden, die in der Praxis sehr oft die Unterscheidung zwischen lautem und leisem Zahnrad ermöglichen und mit den Geräuschordnungen auf dem Prüfstand gut korrelieren. Die Bestimmung des Schrägungswinkels liefert zusätzliche Informationen über die funktionale Wirksamkeit der Welligkeit aber auch über ihre Entstehungsursachen. Die Simulation von Abweichungen für die Fertigungsprozesse Wälzfräsen und Wälzschleifen ermöglicht die Bestimmung der Einflüsse von Fehlern im Prozess oder am Werkzeug. Die vorgestellten Methoden und Werkzeuge sind sehr hilfreich bei der in der Praxis aufwändigen und oft langwierigen Ursachensuche bei Getriebegeräuschen.

7. Literatur

[1] B. Rank; Welligkeiten auf Zahnflanken – Ursachen und akustische Auswirkungen, 5.Tagung Verzahnungsmesstechnik, VDI Bericht 2236, 2014.

[2] F. Descher, W. Winter; Waviness analysis in the serial production of cylindrical gears, International conference on gear production, 2015.

[3] DIN 21772 Zahnräder – Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnungen – Definition der Abweichungen, Beuth Verlag, 2012.

[4] VDI/VDE 2612: Profile and helix checking of involute gears, VDI/VDE, 2000.

[5] G. Gravel; Bestimmung von Welligkeiten auf Zahnflanken, GETPRO Kongress zur Getriebefertigung, 2009.

[6] F. Klocke, C. Gorgels, R. Schalaster, A. Stuckenberg; An innovative way of designing gear hobbing processes, International Conference on Gears, VDI Bericht 2108, 2010.

[7] C. Brecher, M. Brumm, F. Hübner; Manufacturing simulation for generating gear grinding of large-module gears, International Conference on Gears, VDI Bericht 2199, 2013.

[8] S. Kimme, R. Bauer, W.-G. Drossel, M. Putz; Impact of gear finishing process on micro geometry – simulation of defective production processes and resulting properties, International conference on gears, VDI Bericht 2255, 2015.

[9] M. Svahn, L. Vedmar, C. Andersson; Tooth Deviation of an Involute Helical Gear Manufactured in a Simulated Hobbing Process with Introduced Errors, CIRP 1st International Conference on Virtual Machining Process Technology, Montreal, Canada, 2012.

[10] G. Gravel; Simulation von Abweichungen beim Wälzfräsen und Wälzschleifen, GETPRO Kongress zur Getriebefertigung, 2013.