Simulation als Unterstützung der Welligkeitsanalyse

Untersuchung von geometrischen Abhängigkeiten und Fertigungseinflüssen

Prof. Dr.-Ing. **G. Gravel**, HAW Hamburg;

Kurzfassung

Vorgestellt wird ein Softwaretool zur Analyse von Welligkeiten auf Verzahnungsoberflächen. Eine integrierte Simulation von Welligkeiten erlaubt die Beurteilung der Berechnungsverfahren und die Untersuchung der Überlagerung von Balligkeit und Welligkeit. Die Suche nach den Ursachen der Welligkeit wird durch ein neues Simulationswerkzeug unterstützt, das aus Werkzeugfehlern die am Werkstück entstehenden Abweichungen genau berechnen kann. An praktischen Geräuschproblemen wird gezeigt, wie sich in damit simulierten Ordnungsspektren Einflüsse der Prozessparameter und Fehler der Werkzeugaufspannung abbilden.

1. Auswertung von Welligkeiten

Der Geräuschpegel im Innenraum von Pkw's ist ein Kriterium, dem Hersteller und Anwender eine hohe Bedeutung beimessen. Da die Motoren immer leiser und besser gekapselt werden, geraten störende Getriebegeräusche zunehmend in den Fokus [1]. Dies gilt besonders auch bei den E-Antrieben, die zur Gewichts- und Wirkungsgradoptimierung mehrstufige Getriebe benötigen. Welligkeiten auf Verzahnungsoberflächen erzeugen eine Anregung beim Abwälzen und können je nach Eigenfrequenzen und Dämpfung des Getriebes Geräusche erzeugen [2]. Um diese Welligkeiten erfassen zu können, wurde eine Software zur Welligkeitsanalyse entwickelt, die in Bild 1 beschrieben ist [3]. Ausgehend von den Messpunkten eines Verzahnungsmessgerätes werden Ausgleichssinusfunktionen berechnet. Die Kurven mit maximaler Amplitude werden in einem Ordnungsspektrum zusammengefasst. Werden die Abweichungen entsprechend ihrem Drehwinkel verknüpft, so ergibt sich eine geschlossene Kurve über dem Umfang. Diese Art der Auswertung entspricht der Abwälzsituation und berücksichtigt auch die Phasenlage der Einzelkurven zueinander und ihre Überdeckung. Diese Software wird bei vielen Getriebeherstellern standardmäßig eingesetzt, wenn Geräuschprobleme eindeutig einem Zahnrad zugeordnet werden können. In vielen Fällen ist es damit möglich, einer Geräuschordnung im Getriebe objektiv eine geometrische Welligkeit an der Verzahnung zuzuordnen [4]. Dies erleichtert die Ursachensuche oder dient der Prozessüberwachung.

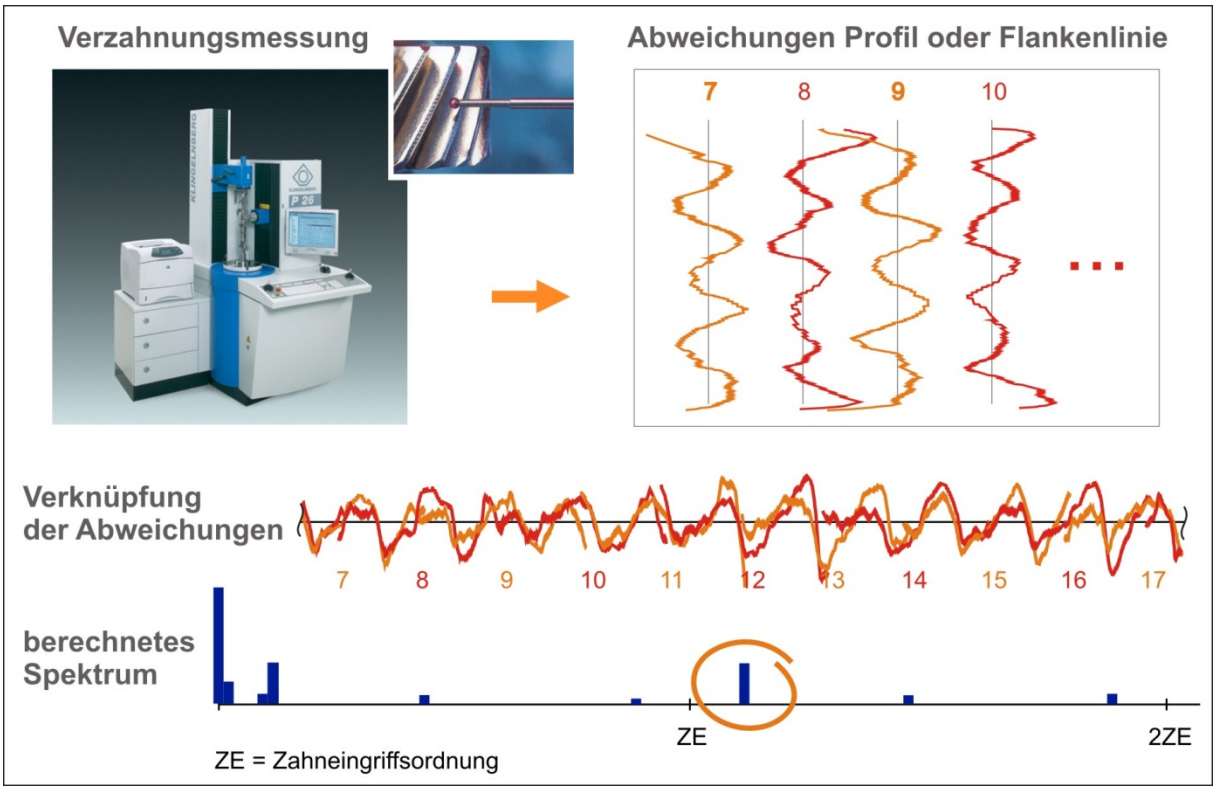


Bild 1: Softwaretool Welligkeitsanalyse

Der Ablauf einer Welligkeitsanalyse ist in Bild 2 dargestellt. Für das real zu betrachtende Zahnrad sollte die Charakterisierung als laut oder leise und bei Auffälligkeit die auf die Zahnradumdrehung bezogene Geräuschordnung bekannt sein. Da Zahnräder üblicherweise viele Ordnungen aufweisen, davon aber erfreulicherweise nur sehr wenige geräuschrelevant sind, ist die Kenntnis dieser Daten und der Lastflanke wichtig, um Fehlschlüsse zu vermeiden. Die realen Formabweichungen machen die Ergebnisse unscharf und die Modifikationen am Werkstück erschweren die Auswertung, da eine Balligkeit auch als Welligkeit interpretiert werden kann.

Im nächsten Schritt werden Messpunkte am Werkstück erfasst. Die Zahl der gemessenen Zähne, der Auswertebereich in den Randzonen und natürlich die Messunsicherheit der Messung beeinflussen wesentlich, inwieweit die reale Oberfläche des Werkstücks im Messdatensatz abgebildet ist. Diese Daten werden anhand des Berechnungsmodells weiterverarbeitet, das festlegt, ob die Messpunkte über dem Drehwinkel aneinandergehängt werden oder als einzelne Kurve an jedem Zahn ausgewertet werden. Ein wichtiger Parameter ist die Wahlmöglichkeit, Ist-Modifikationen (Balligkeit oder Winkelabweichung) vor einer Welligkeitsbewertung zu eliminieren. Im Anschluss erfolgt die Berechnung des Ordnungsspektrums standardmäßig durch Ausgleichssinusfunktionen, alternativ für einzelne Kurven auch durch eine

FFT. Im Ergebnis erhält der Anwender ein Ordnungsspektrum der im Signal vorhandenen Welligkeiten und Ihrer Amplituden. Eine Korrelation mit den Ergebnissen der Geräuschmessung ist oft eindeutig, gelegentlich aber auch unklar oder nicht vorhanden. Unter Umständen muss eine erweiterte Messung durchgeführt werden oder der Auswertebereich dem tatsächlich im untersuchten Lastfall wirksamen Oberflächen-Kontaktbereich angepasst werden.

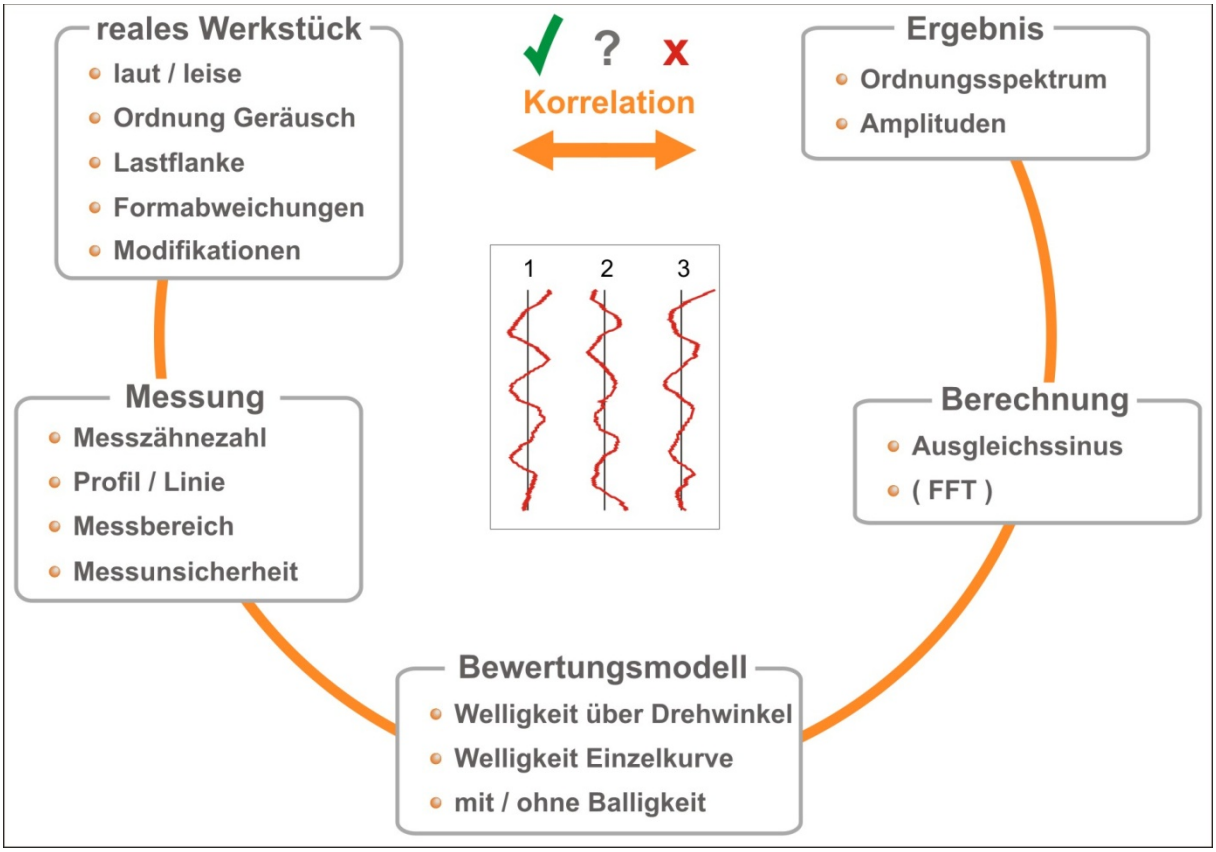


Bild 2: Ablauf einer Welligkeitsanalyse

2. Simulation von Welligkeiten

Die Simulation von Messpunkten stellt in dem Ablauf von der Erfassung der Daten bis zum Ordnungsspektrum ein wichtiges Hilfsmittel dar für die Beurteilung der Genauigkeit der Auswertung aber auch für die Abschätzung der Wirkung von geometrischen Einflüssen auf das Berechnungsergebnis. Da die Simulation auch für das Verständnis der geometrischen Ausprägung einer betrachteten Welligkeit sehr hilfreich ist, ist die Simulationsmöglichkeit von Welligkeiten für den Anwender der Software standardmäßig verfügbar. Wie das Bild 3 illustriert, können in der Simulation alle Parameter einer Messung berücksichtigt werden, ergänzt um die Möglichkeit, Modifikationen und den Einfluss der Messgeräteauflösung zu modellieren. Im Folgenden werden die Möglichkeiten und Ergebnisse dieser Simulation an verschiedenen Beispielen diskutiert.

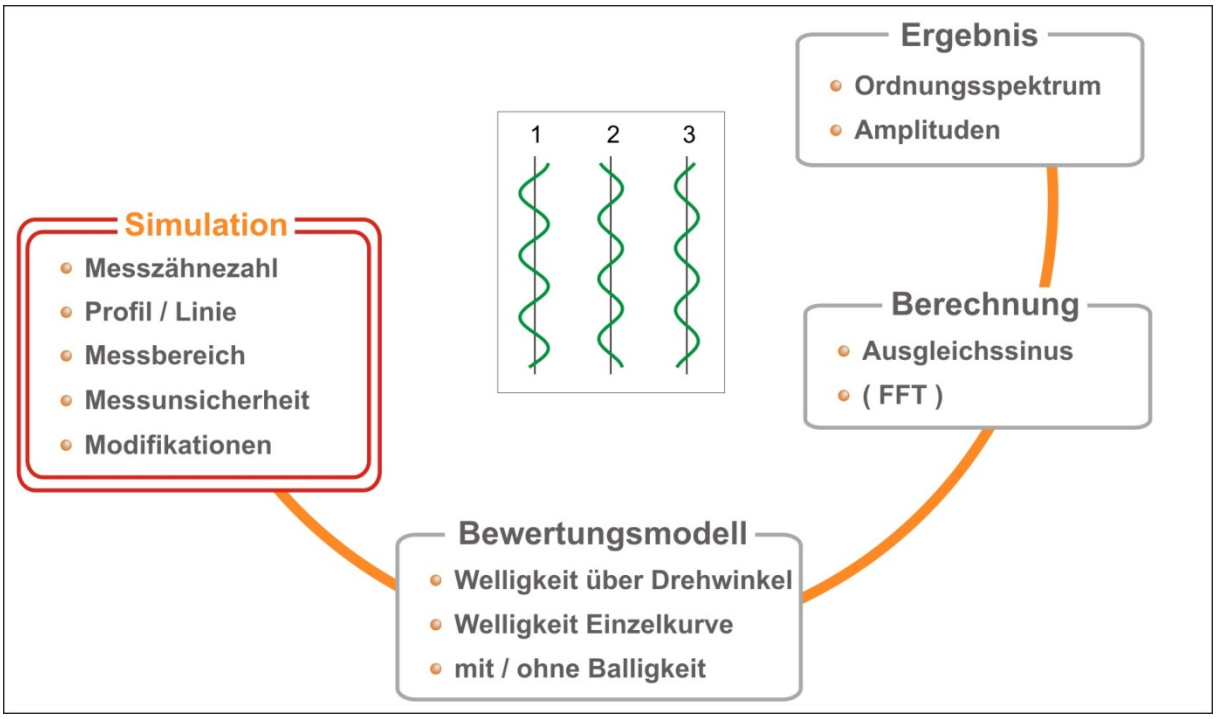


Bild 3: Welligkeitsanalyse mit simulierten Daten

3. Anwendungsbeispiele der Simulation von Welligkeiten

Das erste Beispiel in Bild 4 behandelt einen Vergleich der Auswerteverfahren FFT und Ausgleichssinus. Es wurden 2 niederfrequente, relativ nah beieinander liegende Welligkeiten

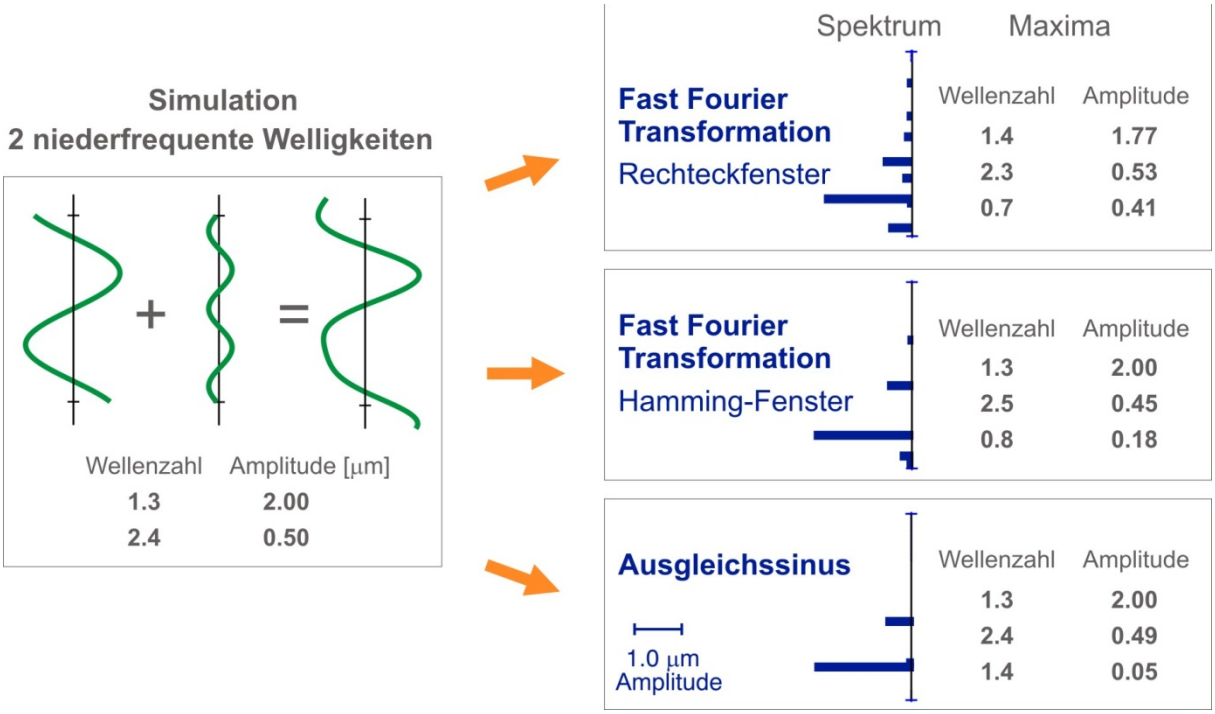


Bild 4: Vergleich der Auswertemethoden Ausgleichssinus und FFT

simuliert, wie sie bei Zahnrädern häufig zu finden sind. Das überlagerte Signal wurde mit dem Standardverfahren Ausgleichssinus und mit einer FFT-Auswertung mit Rechteckfenster und einer mit Hamming-Fenster ausgewertet. Bei FFT mit Rechteckfenster entsteht ein breites Spektrum, die Amplituden weisen max. eine Abweichung von 10 % auf, es entsteht als 3.Ordnung eine Wellenzahl 0.7 mit signifikanter Amplitude. Bei Nutzung eines Hamming-Fensters sind die Abweichungen prozentual ähnlich, die Amplitude der 3.Ordnung ist kleiner. Bei der Auswertung mit Ausgleichssinus sind die Fehler sehr gering, eine neue 3.Ordnung liegt mit sehr geringer Amplitude nah an der Originalwelligkeit. Kritisch für eine Welligkeitsanalyse sind nicht die Amplitudenabweichungen, sondern die Entstehung neuer Ordnungen durch die Auswertung. Dies führt zu fehlerhaften Annahmen bezüglich der Welligkeit der Verzahnung. Aus diesem Grund ist die Auswertung mit Ausgleichsinus vorzuziehen.

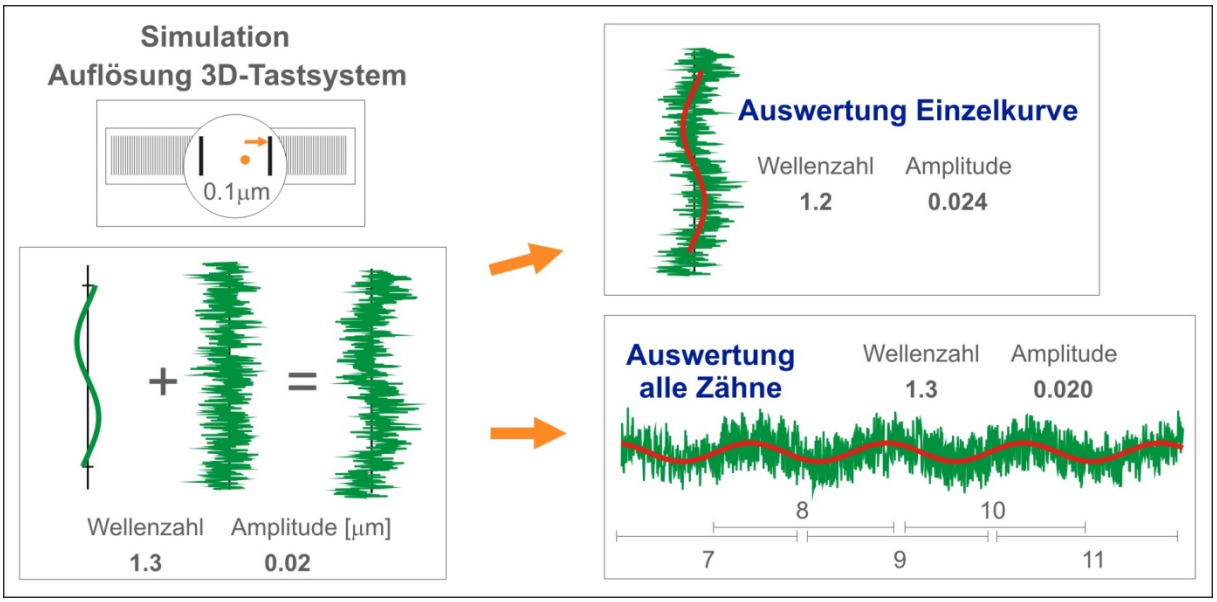


Bild 5: Einfluss der Maßstabsauflösung

Das zweite Beispiel untersucht den Einfluss der Auflösung der Maßstäbe des Messgerätes. Dazu wurde eine Welligkeit mit 1.3 Wellen im Auswertebereich und einer Amplitude von 0.02µm mit 500 Messpunkten pro Zahn simuliert. Da alle Messpunkte als 3D-Daten realisiert sind, kann eine Rundung durch eine begrenzte Masstabsauflösung einfach an den Messpunkten simuliert werden. Bei einer Maßstabsauflösung von 0.1µm wird die Wellenzahl einer Einzelkurve noch gut erkannt, der Amplitudenfehler beträgt 20%. Werden alle Zähne gemessen und verknüpft, so treten keine Abweichungen auf. Die Simulation macht deutlich, dass durch die großen Punktezahlen -ähnlich wie in der Bildverarbeitung- Welligkeiten mit Amplituden kleiner als die Auflösung sicher erkannt werden können. Eine Aussage zur Messunsicherheit einer Welligkeitsmessung lässt sich daraus allerdings nicht ableiten. Hier sind unter

Anderem die Genauigkeit des Tastsystems, des Drehtisches und der Bewegungsachsen von entscheidender Bedeutung. Für die in Pkw-Getrieben auftretenden Welligkeiten sind Messgeräte und Tastsysteme höchster Präzision notwendig.

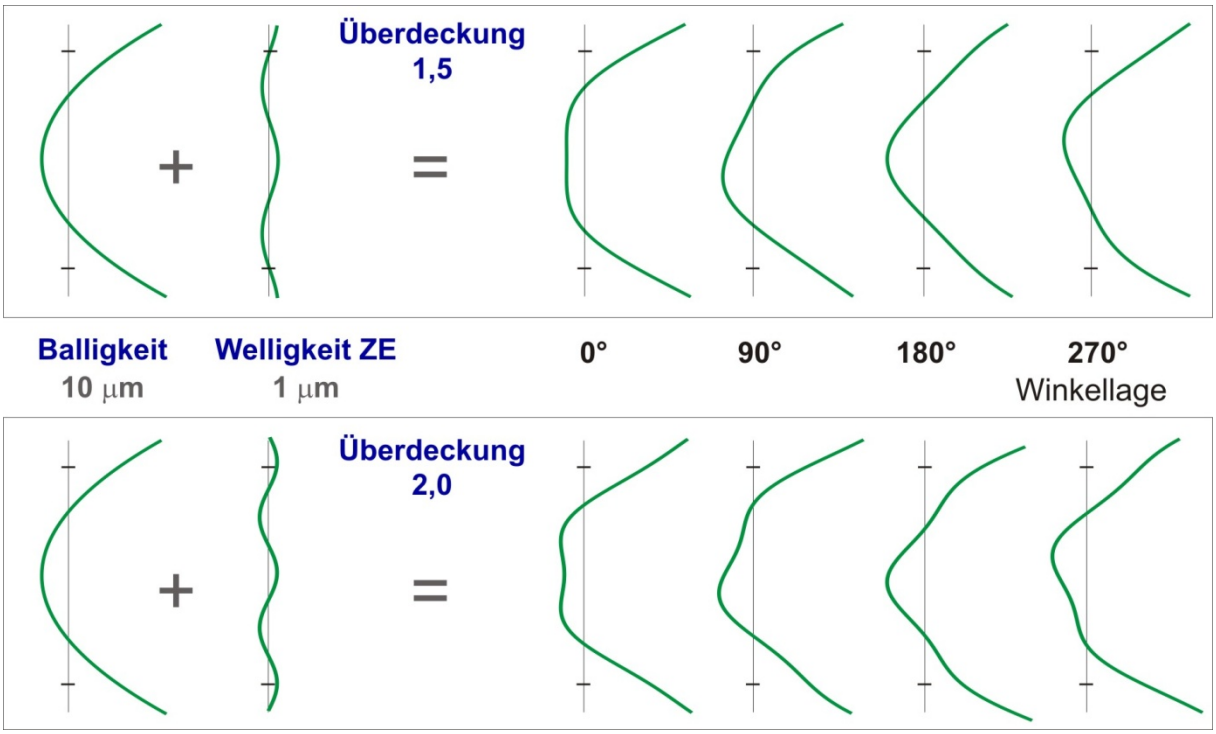


Bild 6: Überlagerung von Balligkeit und Welligkeit mit Zahneingriffsordnung

Ein letztes Beispiel soll den Zusammenhang von Balligkeit und Welligkeit aufzeigen. Simuliert wird eine Balligkeit überlagert mit einer Welligkeit in Zahneingriffsordnung (ZE). Dabei wird die Phasenlage der Welligkeit verändert. Bei einer Überdeckung von 1.5 im Bild 6 oben ergeben sich nur 1.5 Wellen im Auswertebereich. In der Praxis wird die entstehende Form der Parabel kaum als Welligkeit erkannt und interpretiert. Erst wenn eine Überdeckung von 2.0 vorhanden ist -eine Zahneingriffsordnung also 2 Wellen im Auswertebereich besitzt- werden Welligkeiten auch im normalen Abweichungsplot sichtbar. Dem Anwender liefert die Möglichkeit der Simulation verschiedener Welligkeiten und Modifikationen Antworten darauf, warum die laute Verzahnung in der Standardauswertung unauffällig aussieht oder sich eine Geisterordnung manchmal nur als wechselnde Form der Balligkeit darstellt.

4. Simulation von Abweichungen beim Wälzfräsen und Wälzschleifen

Ausgehend von den Ergebnissen einer Verzahnungsmessung schließt sich bei Toleranzüberschreitung regelmäßig die Suche nach den Ursachen für die Abweichungen an [5]. Wesentliche Informationen sind dabei neben der Art der Abweichungen die Prozessparameter

der Fertigung. Allerdings sind insbesondere die Prozesse der abwälzenden Verzahnungsfertigung wie das Wälzfräsen und das Wälzschleifen z.B. bei mehrgängigen Werkzeugen so komplex, dass man sich kaum vorstellen kann, welchen Einfluss Abweichungen am Werkzeug oder ein Taumel in seiner Aufspannung auf das Werkstück haben werden. Simulationsprogramme sind hier sehr hilfreich [6], [7]. Für die Fertigungsprozesse Wälzfräsen und Wälzschleifen wurde daher ein neues Simulationstool entwickelt, dass es erlaubt, die im Herstellprozess entstehenden Abweichungen zu berechnen [8]. Die wesentlichen Eigenschaften sind in Bild 7 illustriert.

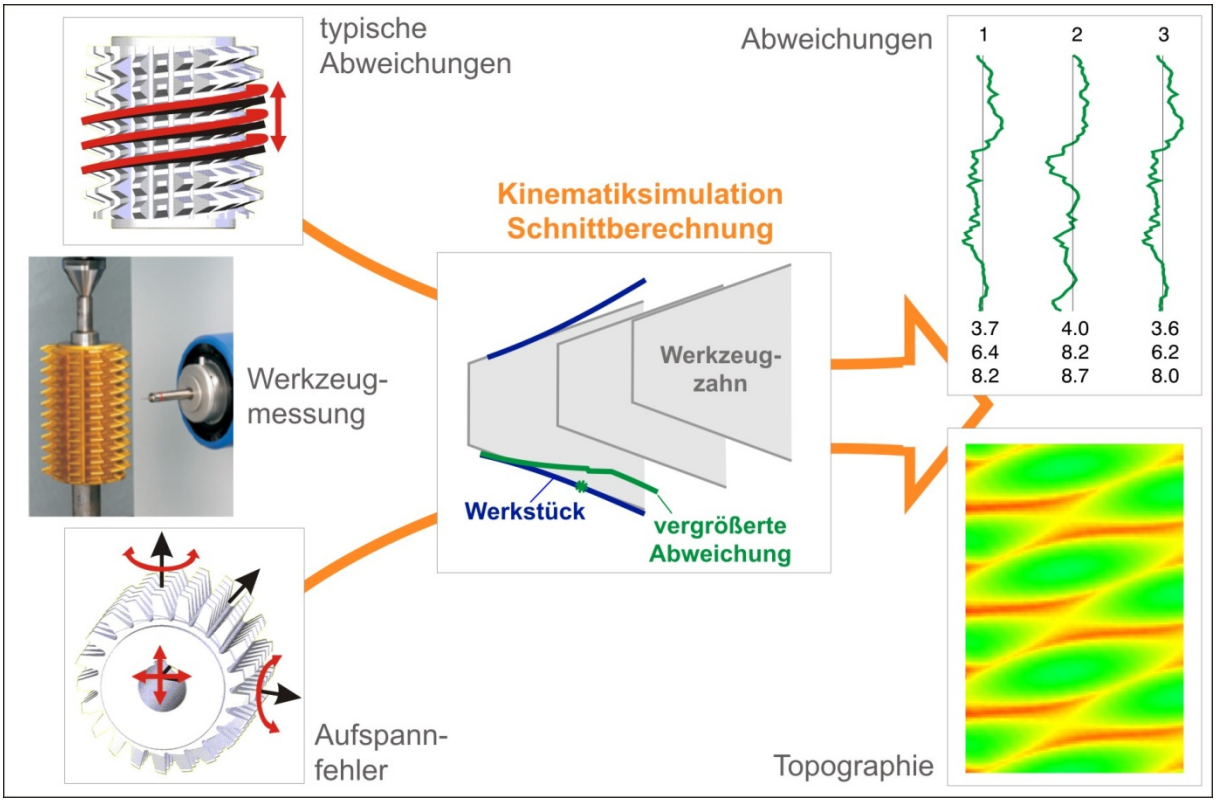


Bild 7: Softwaretool Simulation Wälzfräsen und Wälzschleifen

Für das Wälzfräsen werden alle - für das Wälzschleifen ausreichend viele - Schneiden des Werkzeuges abgebildet und mit der Kinematik der Werkzeugmaschine bewegt. In der anschließenden Schnittberechnung wird der Berührpunkt von Werkzeugschneide und Werkstück-Messpunkten bestimmt. Für jede gewünschte Messpunktkurve kann so die hergestellte Kontur berechnet werden. Eine topographische Beurteilung der Zahnflankenfläche wird möglich, wenn viele Profilschnitte berechnet werden. Neben der fehlerfreien Simulation, in der dann nur Vorschubmarkierungen und Hüllschnittabweichungen wirksam sind, können typische Abweichungen am Werkzeug wie Gangsteigungsfehler oder eine Verschiebung der Gänge zueinander simuliert werden. Es können auch die Messergebnisse einer Wälzfrässermessung genutzt werden, um dann präzise die Abweichungen vorherzusagen, die der ver-

messene Fräser am Werkstück erzeugen wird. Und schließlich kann per Mausclick ein Aufspannfehler erzeugt werden, der das Werkzeug bei der Bearbeitung taumeln lässt.

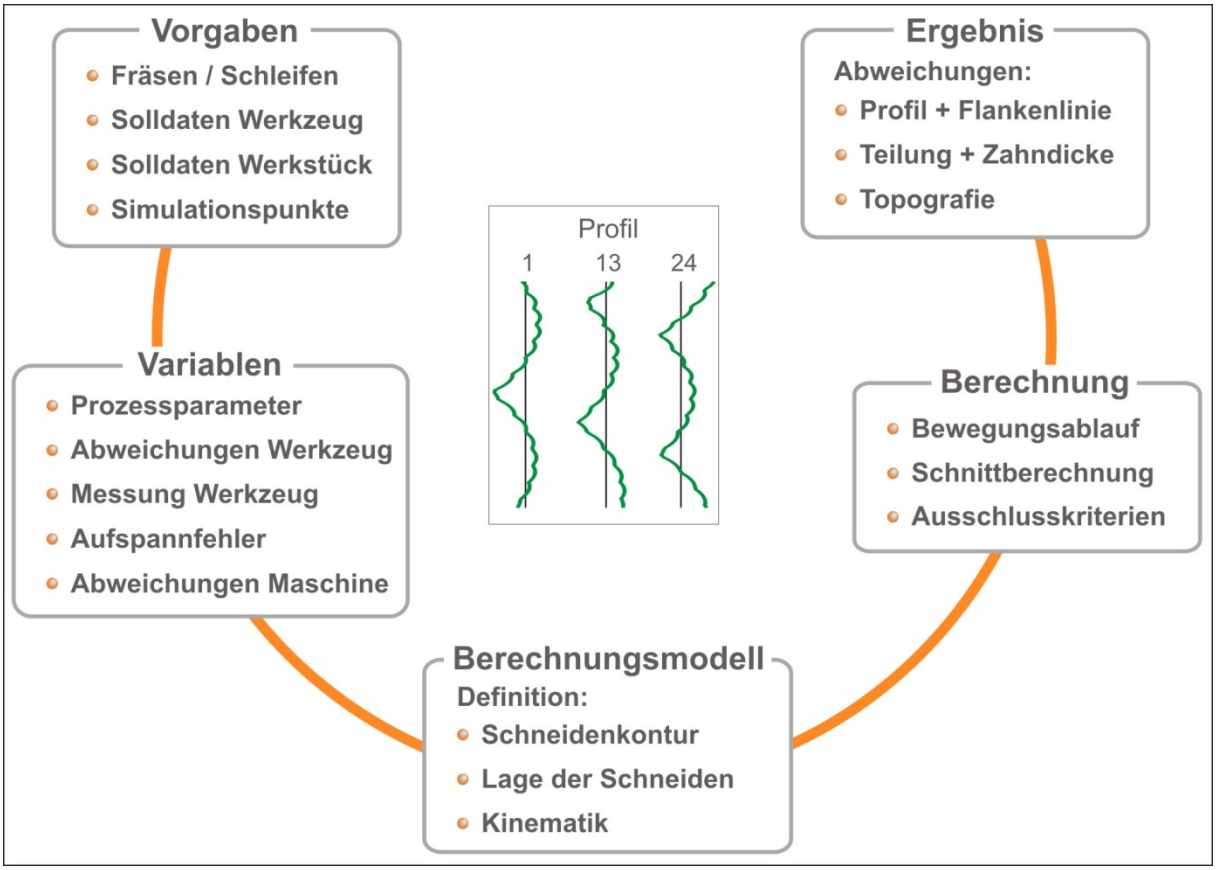


Bild 8: Ablauf einer Wälzsimulation

Der Ablauf der Wälzsimulation ist in Bild 8 detaillierter beschrieben. Vorgaben sind die Solldaten des Werkstücks und des Werkzeugs, die auch aus einer Messung übernommen werden können. Der Anwender entscheidet dann, an welchen Punkten der Werkstückoberfläche die Simulationsberechnung durchgeführt werden soll. Variabel und damit für einen Vergleich veränderbar sind die Prozessparameter, die Abweichungen am Werkzeug, seine Lagefehler oder auch Abweichungen der Werkzeugmaschine. Das Berechnungsmodell setzt die Vorgaben und Abweichungen um in die Schneidenkontur, in die Lage der einzelnen Schneiden und in die Bewegungskinematik. In der Berechnung wird dann durch Kopplung von Bewegungsablauf und Schnittberechnung die entstehende Kontur bestimmt. Wesentlich für die Geschwindigkeit der Berechnung ist die Definition und Anwendung von Ausschlusskriterien, die festlegen, welcher Punkt der Werkzeugkontur und welche Werkzeugschneide nicht schneiden kann und damit nicht berücksichtigt werden muss. Im Ergebnis entstehen dann die Abweichungen der gewählten Simulationspunkte. Ein wesentliches Merkmal ist hier, dass alle simulierten Abweichungen wie gemessene Abweichungen dargestellt werden und so ein

einfacher Vergleich zwischen Messung und Simulation oder die Weiterverarbeitung über eine Welligkeitsanalyse möglich ist. Im Folgenden soll die Anwendung dieser Wälzsimulation an zwei Beispielen aufgezeigt werden.

5. Simulationsunterstützung bei Geräuschproblemen

In Bild 9 sind am Beispiel einer wälzgeschliffenen Verzahnung links die Spektren der Welligkeitsauswertung einer lauten und einer leisen Verzahnung für die rechte Flanke dargestellt. Das laute Zahnrad weist in der Geräuschprüfung einen hohen Pegel in der Ordnung 56/57 auf, die auch im Welligkeitsspektrum zu finden ist. Eine Wälzsimulation mit angenommen Taumel der Schleifschnecke durch Rundlaufabweichung am Hauptlager und eine anschließende Welligkeitsauswertung ergibt im Profil eine Ordnung 56. Die nicht exakte Ordnung 56 bzw. 57 ergibt sich aus der Tatsache, dass die Zähnezahl von Werkstück und die Gangzahl

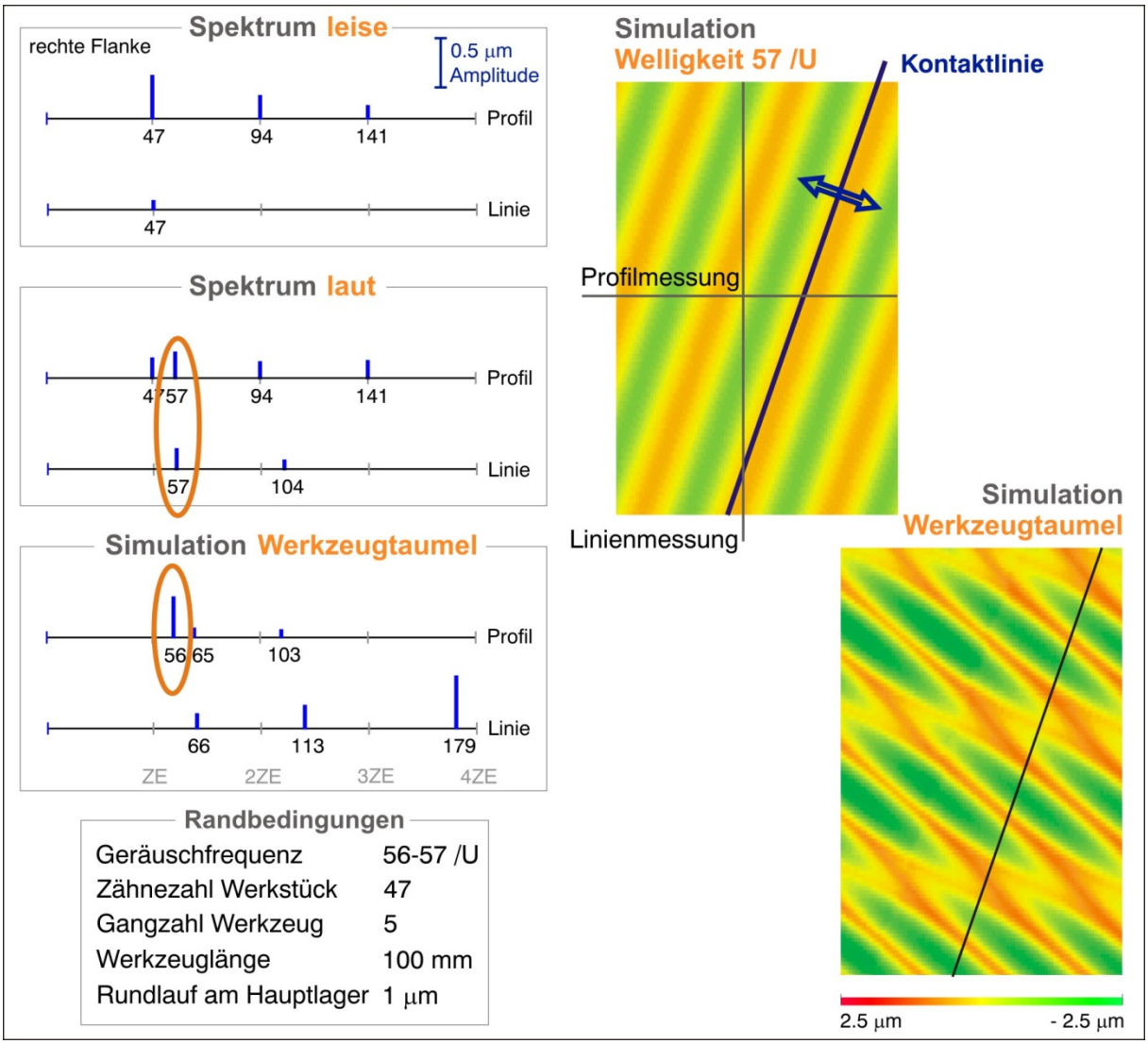


Bild 9: Beispiel Geräuschproblem beim Wälzschleifen

des Werkzeugs nicht genau teilbar sind. Dadurch wechselt die Zuordnung von Werkstückzahn und Werkzeuggang nach jeder Umdrehung. Ein Fehler an einem Werkzeuggang läuft auf einer Spirale in Achsrichtung [9] und wird so nicht ganzzahlig über dem Umfang abgebildet. Formabweichungen beeinflussen dann die Rundung nach oben oder unten.

Es wird deutlich, dass ein Werkzeug- oder Aufspannfehler in diesem Beispiel Ursache der Welligkeit sein kann. Diese geometrische Anregung im Profil äußert sich dann in einer Maschinenschwingung, die im Ergebnis auch in der Flankenlinie wirksam ist. Zur weiteren Untersuchung wurde zunächst eine ideale Welligkeit von 57 Wellen pro Umdrehung als Topographie simuliert. Die umlaufende Welligkeit ist in Achsrichtung um den Grundschrägungswinkel geneigt, wie die Kontaktlinie beim Abwälzen mit dem Gegenrad. Beim Abwälzen läuft die Kontaktlinie dann auf ganzer Länge durch Berg und Tal der Welligkeit. Unten rechts im Bild ist die Topographie dargestellt, die sich geometrisch aus der Wälzsimulation mit dem beschriebenen Taumel ergibt. Die dominant zu erkennende Welligkeit besitzt im Profil eine Ordnung 56 und in der Flankenlinie eine Ordnung 179, erzeugt durch den Taumelfehler und das Verhältnis von Zähnezahl zu Gangzahl. Diese Welligkeit läuft nicht in Richtung der Kontaktlinie, sondern fast senkrecht dazu. Allerdings ist im Muster zu erkennen, dass die tragenden Flächen sich ändern. Diese geometrische Änderung wird beim Wälzschleifen vermutlich zu Kraftschwankungen [10] führen, die dann die Ordnung 57 erzeugen.

Ein weiteres Beispiel einer Welligkeitsanalyse einer lauten Verzahnung ist in Bild 10 dargestellt. Die hier betrachtete Verzahnung wurde durch Wälzfräsen vorbearbeitet und anschließend gehont. Das gemessene Werkstück fällt in der Geräuschprüfung bei einer Ordnung 37 durch. Eine fehlerfreie Simulation des Wälzfräsens zeigt einige der Ordnungen des gemessenen Rades. Durch Variation des Axialvorschubes und der Spannutenzahl des Wälzfräsers ändern sich diese Ordnungen zum Teil sprunghaft oder in Kombination. Wird eine dieser Ordnungen zu einem Geräuschproblem, kann dieses Problem u.U. durch Änderung der Prozess- oder Werkzeugparameter gelöst werden. Wird nun in der Simulation ein Werkzeugexzenter eingegeben, so entstehen viele neue Ordnungen als Seitenbänder zu den Zahneingriffsordnungen mit einem Abstand von 28/3 Ordnungen. Die Topografie mit simuliertem Werkzeugexzenter zeigt wieder eine dominante Welligkeit, die fast senkrecht zur Kontaktlinie läuft. Das Muster ist allerdings wesentlich komplexer und erklärt die vielen Ordnungen, die entstehen. Im Vergleich von Messung und Simulation mit Werkzeugexzenter wird deutlich, dass fast alle Ordnungen des gehonten Rades schon beim Fräsen erzeugt werden. Da die Oberfläche des Rades beim Honen vollständig bearbeitet wurde, scheint das Honrad den vorhandenen Welligkeiten zu folgen. Natürlich könnte auch das gefräste Zahnrad vor dem

Honen gemessen werden, es enthält aber alle Abweichungen der Fertigung als Summe. Eine Simulation erlaubt dagegen eine differenziertere Betrachtung der Einflussgrößen auf einzelne Ordnungen im Spektrum.

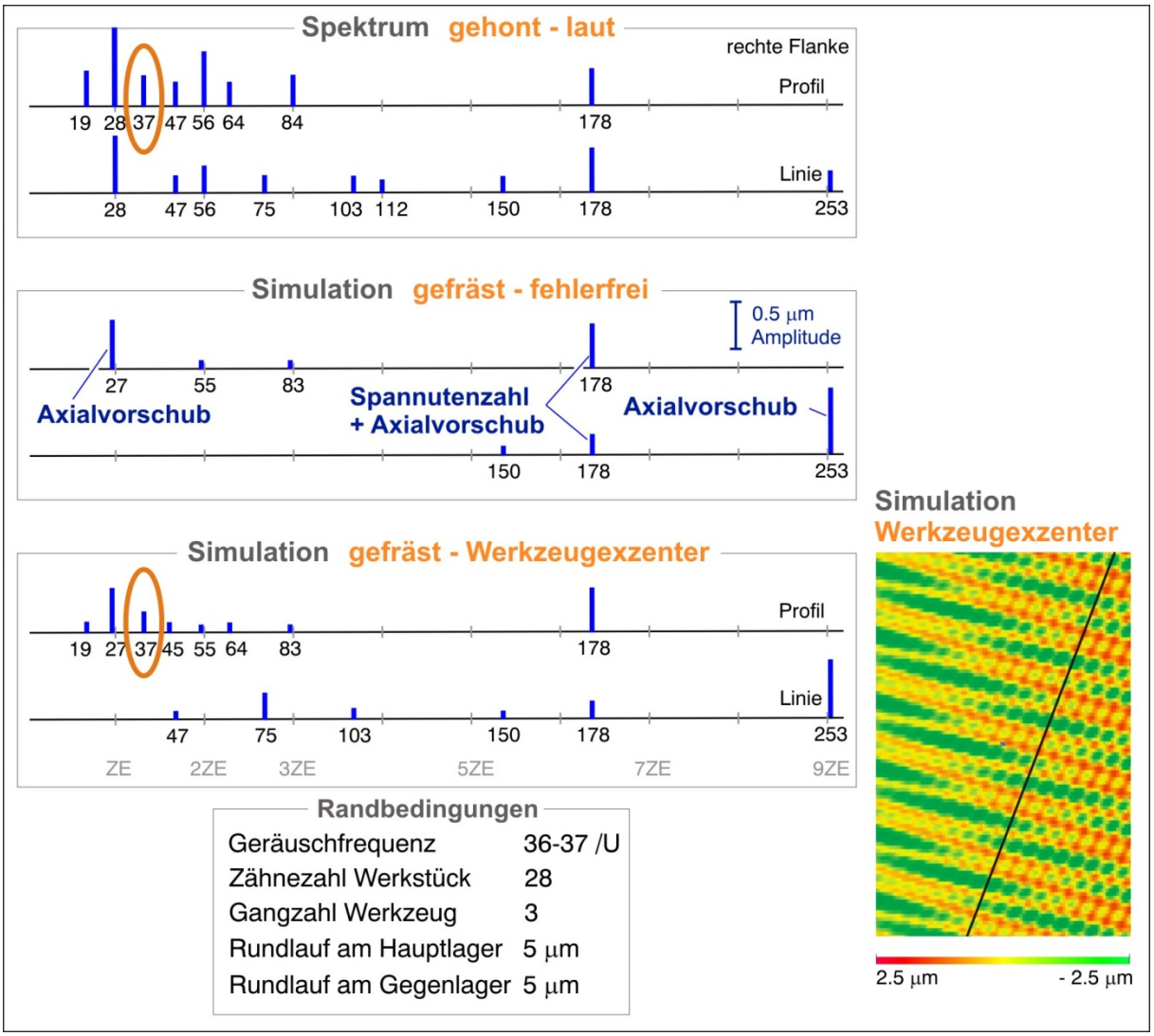


Bild 10: Beispiel Geräuschproblem beim Honen

6. Zusammenfassung

Eine Welligkeitsanalyse stellt bei Geräuschproblemen ein wichtiges Hilfsmittel dar, um Welligkeiten auf Verzahnungsoberflächen zu beschreiben und ihre Ursachen zu ermitteln. Ergänzend bietet die integrierte Simulation von Welligkeiten die Möglichkeit, Berechnungen zu überprüfen und Einflüsse auf das Ergebnis abzuschätzen. Sie erlaubt es, die geometrischen Zusammenhänge zwischen Balligkeit und Welligkeit zu untersuchen und den Verlauf von Welligkeiten in der Topographie zu verstehen.

Die Ursachen und Einflüsse auf die Entstehung von Welligkeiten auf Zahnflanken sind vielfältig und vor allem in der abwälzenden Verzahnungsbearbeitung komplex. Eine neue Simulationssoftware erlaubt es, Verzahnungsabweichungen bei diesen Herstellprozessen so genau zu berechnen, dass damit auch eine Welligkeitsauswertung möglich ist. Durch die Variation von Prozessparametern und Werkzeugfehlern können selektiv die entstehenden Abweichungsmuster und Anregungen im Zerspanprozess bestimmt werden. Zusammenfassend bieten diese neuen Simulationstools die Möglichkeit, Geräuschprobleme durch Welligkeiten auf Verzahnungsoberflächen objektiv zu analysieren und die Ursachensuche effektiv zu unterstützen.

Literatur:

[1] Brecher, C.; Brumm, M.; Carl, C.: Experimental analysis and numerical simulation of the psychoacoustic evaluation of gearbox noise, International Conference on Gears, VDI-Bericht 2199, 2013

[2] Rank, B.: Verzahnungsmesstechnik aus Anwendersicht – ein Erfahrungsbericht, VDI-Bericht 1880, 2005

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

[4] Rank, B.: Geräuschanalyse an PKW-Automatikgetrieben in der Praxis, VDI-Bericht 2148, 2011

[5] Gravel, G.: Simulation und Korrektur von Fertigungsabweichungen - Qualitätsregelkreis Zahnradproduktion, VDI-Bericht 2148, 2011

[6] Klocke, F.; Weber, G.-T.; Stuckenberg, A.; Krömer, M.; Kobialka C.: Simulation-based process design for gear hobbing, International Conference on Gears, VDI-Bericht 2199, 2013

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

[8] Gravel, G.: Simulation of Deviations in Hobbing and Generation Grinding, International Conference on Gears, VDI-Bericht 2199, 2013

[9] Thyssen, W.: Anforderungen an hartfeinbearbeitete Stirnradverzahnungen zur Minimierung der Geräuschemission, Tagung Feinbearbeitung von Zahnrädern, WZL-RWTH Aachen 2013

[10] Börner, J.; Joachim, F.-J.: Design of Transmission Gearings for Low Noise Emission, International Conference on Gears, VDI-Bericht 2199, 2013