

# Die Bedeutung der E-Mobilität für das Wälzschleifen von Verzahnungen mit Fokus auf das Geräuschverhalten im Getriebe

Maximilian Zimmer

Reishauer AG, Wallisellen, Schweiz, [maximilian.zimmer@reishauer.com](mailto:maximilian.zimmer@reishauer.com)

## Zusammenfassung:

Im Rahmen dieses Beitrags werden praxisnah aus Sicht eines Werkzeugmaschinenherstellers die erhöhten Herausforderungen an eine wirtschaftliche Herstellung von Verzahnungen für E-Motive-Anwendungen adressiert. Die Einflussgrößen auf das Geräuschverhalten («NVH – Noise Vibration Harshness») werden insbesondere aus fertigungstechnischer Sicht aufgezeigt und evaluiert. Ebenso werden basierend darauf Messmethoden zur Bewertung des Geräuschverhaltens einer Verzahnung vorgestellt und an Praxisbeispielen erläutert. Es werden Technologien vorgestellt, mit deren Hilfe das Geräuschverhalten einer Verzahnung aus Sicht des Fertigungseinflusses positiv beeinflusst werden kann, wie z.B. Optimierung der Eingriffsverhältnisse, spezielle Shiftstrategien oder Berührlinienwelligkeiten und Schleifen mit mehrteiligen Schleifschnecken.

Diese und weitere Massnahmen zielen insbesondere darauf ab, die Zahneingriffsordnungen (ZEO) und deren Harmonische zu reduzieren. Treten daneben auch Störordnungen ausserhalb der ZEO auf (Geisterordnungen), so sind diese meist mit einer eigen- oder fremderregten Schwingung im Schleifprozess begründbar. Die Ursachenforschung hierfür ist oftmals recht mühsam und wird künftig insbesondere durch das sog. ARGUS-Monitoringsystem (Prozess- und Komponentenüberwachungssystem der Fa. Reishauer AG) erleichtert werden, welches an dieser Stelle ebenfalls kurz vorgestellt wird.

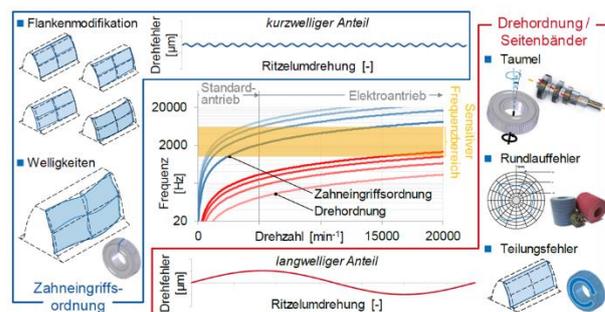
**Schlüsselwörter:** Noise Vibration Harshness, E-Mobilität, Wälzschleifen, Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen

## 1. Einleitung

Das Thema Getriebegeräusche steht bei Getriebe- und Zahnradherstellern aktuell vor dem Hintergrund der Elektromobilität verstärkt im Fokus der Entwicklung. Die fehlende Maskierung durch den Verbrennungsmotor, sowie die deutlich höheren Drehzahlen, bringen ganz neue, höhere Anforderungen an die Oberflächenqualität der Verzahnungen in der Hartfeinbearbeitung mit sich. Diese höheren Anforderungen spiegeln sich in neuen technologischen Verfahrensvarianten in der Werkzeugmaschine zur Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen im kontinuierlichen Wälzschleifprozess wider.

Aufgrund der hohen Eingangsdrehzahlen bei Elektrogetrieben werden nun Abweichungen hörbar, die bisher eine untergeordnete Rolle gespielt haben. Bisher sind im Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor kurzweilige Abweichungen von Zahn zu Zahn signifikant, die die Zahneingriffsordnungen (ZEO) und deren Harmonische anregen, wie bspw. Profilmodifikationen bzw. -abweichungen, die aus Tragfähigkeitsgründen erforderlich sind. Die auftretenden kurzweiligen Anregungen fallen bei schnelllaufenden Getrieben lediglich hinsichtlich der 1. ZEO ins Gewicht, wohingegen die höheren Harmonischen mit zunehmender Drehzahl ausserhalb des wahrgenommenen Bereiches fallen. Demgegenüber liegen die Drehordnungen des Zahnrades (d.h. Abweichungen über einer Umdrehung der Verzahnung wie Taumel, Rundlauf- und

Teilungsfehler usw.) und die Höherharmonischen über einem weiten Frequenzbereich im hörbaren und zum Teil im sensitiv kritischen Bereich des Menschen, siehe Abbildung 1.



**Abbildung 1: Geräuschregung im elektrifizierten Antriebsstrang nach Ahmad [1]**

Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend die Einflussgrößen auf das Geräuschverhalten skizziert, Messverfahren zu deren Erkennung erläutert und insbesondere die technologischen Massnahmen beim Verzahnungswälzschleifen vorgestellt, die während der Bearbeitung eine Oberflächenstruktur mit möglichst geringer Geräuschregung erzeugen.

**2. Verzahnungsanregung und Messmethoden**

**2.1 Ursachen der Geräuschanregung im Getriebe**

Geräuschemissionen stellen in Fahrzeuggetrieben zunehmend ein Problem dar, da andere Erregerquellen (Motor, Abrollgeräusche, Windgeräusche, ...) an Bedeutung verlieren bzw. in den typischen Fällen der Geräuschbelastung wie z.B. dem Stadtverkehr eine untergeordnete Bedeutung haben. Erregerquellen für Getriebegeräusche sind nach Kohn et al [2] insbesondere:

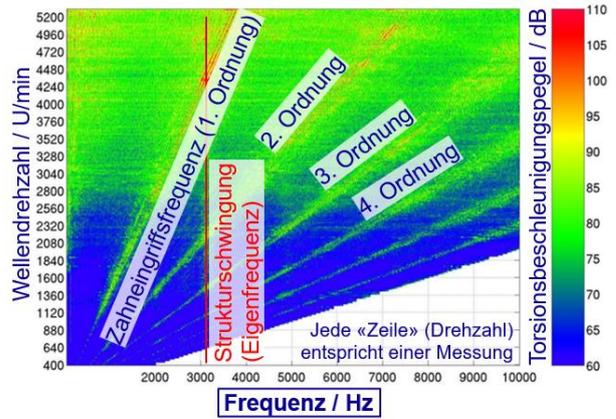
- Verzahnung
  - Veränderliche Hebelverhältnisse im Eingriff und damit veränderliche Zahnpaarsteifigkeit
  - Veränderliche Krümmungsradien im Hertz'schen Kontakt
  - Abweichungen von der idealen bzw. mathematisch exakten Verzahnungskontur
    - Modifikationen der Verzahnung in Abhängigkeit vom Lastzustand wechselnden Verformungen
    - Fertigungsbedingte Abweichungen wie z.B. verfahrensbedingte Verschränkung
  - Oberflächenstruktur und Rauheit der Flanken
    - Periodische Abweichungen (Welligkeiten) auf den Verzahnungsflankenflächen infolge von Anregungen im Bearbeitungsprozess
- Welle-Lager System
  - Drehungleichförmigkeiten bzw. Rundlaufabweichungen der Getriebewellen
  - Eigenanregung der Wälzlager infolge Wälzkörperumlauf

In den nachfolgenden Abschnitten wird der Fokus auf geometrische Abweichungen von der idealen Verzahnungskontur, sowie die Einflüsse der aus dem Wälzschleifprozess resultierenden Oberflächencharakteristik auf den Zahnflanken gelegt.

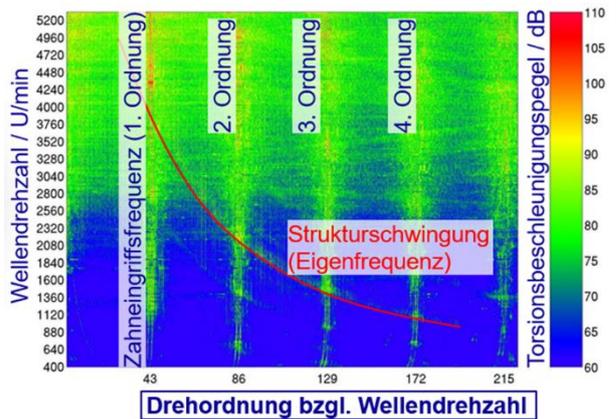
**2.2 Messtechnischer Nachweis von Verzahnungsgeräuschen**

Das «Visualisieren» von Getriebegeräuschen erfolgt in der Regel durch eine Spektralanalyse aus Prüfstands- und sog. «End-of-Line» (EoL)-Messungen. Dabei werden nach Linke [3] beispielsweise Torsions- und Biegebeschleunigungs-sensoren an den Radkörpern der Verzahnung angebracht, der Körperschall an den Lagerschilden bzw. dem Getriebegehäuse gemessen, oder eine Drehwinkelmessung an den Radkörper durchgeführt. Als Standard-Auswertungsmethode der resultierenden diskreten Zeitsignale hat sich die Fast-Fourier-Transformation (FFT) bewährt, die Darstellung erfolgt in Frequenzdarstellung üblicherweise als sog. «Wasserfall-Diagramm», in Ordnungsdarstellung als «Campbelldiagramm» [4]. Letztere hat sich für die spektrale Auswertung rotierender Maschinenelemente durchgesetzt: die Frequenzachse wird umskaliert und auf die Drehfrequenz des Zahnrades bezogen. Diese Frequenz wird «Ordnung» genannt. Als Anregungsordnung wird also das Vielfache zur Drehzahl des Zahnrades bezeichnet, so dass die resultierenden Anregungen mit

Zahneingriffsfrequenz (und deren Harmonischen) der Anregungsordnung «Zähnezahl» (und deren Vielfachen) entsprechen. Nachfolgend ist in Abbildung 2 eine exemplarische Frequenzdarstellung als Wasserfalldiagramm sowie deren Umskalierung als Campbelldiagramm in Ordnungsdarstellung gezeigt.



a) Frequenzdarstellung: Wasserfalldiagramm

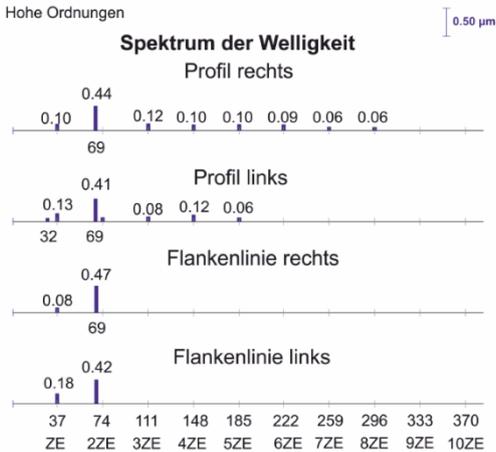


b) Ordnungsdarstellung: Campbelldiagramm

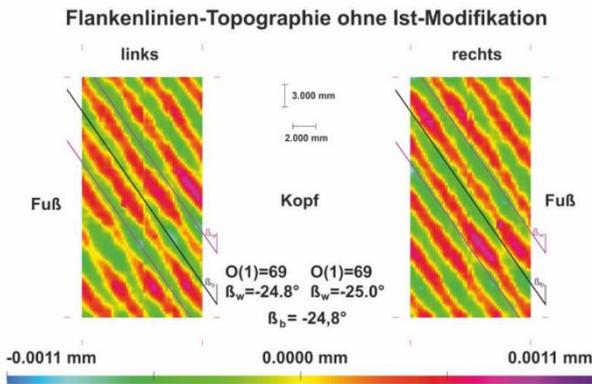
**Abbildung 2: Spektralanalyse am Prüfstand**

Wird auf dem Geräuschprüfstand eine auffällige Ordnung, wie z.B. Zahneingriffsordnung oder eine davon abweichende sog. «Geisterordnung» entdeckt, so lässt sich häufig eine Korrelation mit einer sog. «Welligkeitsanalyse» (auch bekannt als «Gravel-Analyse») finden. Dabei handelt es sich um eine Allzahnmessung auf taktilen Verzahnungsmessmaschinen der Fa. Klingelberg mit hoher Auflösung. Durch räumliche Aneinanderreihung der gemessenen Ist-Flankenformen wird nach Kahnenbley [5] unter Eliminierung der geometrischen Modifikationen und unter Berücksichtigung der räumlichen Überlappung ein Ausgleichssinus durch die resultierende Abwicklung der zusammengesetzten Messkurve gelegt. Welligkeiten, deren Amplituden im Sub-Mikrometerbereich liegen, können mit dieser Auswertesoftware detektiert werden. Nachfolgend ist in Abbildung 3 beispielhaft das Resultat der Welligkeitsanalyse eines abweichungsbehafteten Zahnrades zu sehen. Die Störordnung tritt als ganzzahlige

Ordnung in Profil- und Flankenlinie unter einem Welligkeitswinkel in Erscheinung, der mit dem Grundschrägungswinkel  $\beta_b$  und damit der räumlichen Lage der Berührlinie mit dem Gegenrad übereinstimmt. Die Verzahnung ist damit besonders geräuschkritisch, da die Durchsenkung unter Last im Zahneingriff mit der unkontrollierten Phasenlage der  $\beta_b$ -Welle aufsummiert wird.



a) Ordnungsspektrum eines welligkeitsbehafteten Zahnrads mit einer Geisterordnung  $O = 69$



b) korrespondierende Topographie der Welligkeit  
**Abbildung 3: Welligkeitsanalyse nach Gravel [5]**

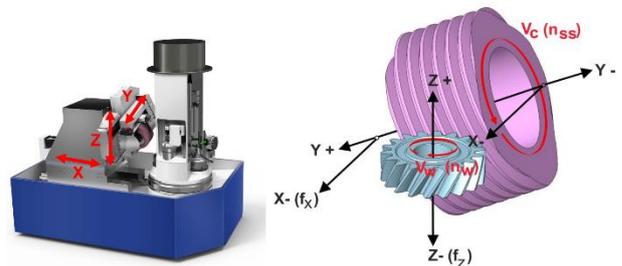
Als Nachteil der Gravelmessung ist zu nennen, dass ein Reverse-Engineering in Form einer Ursachensuche in der Regel sehr aufwendig und nicht immer eindeutig ist. Ferner ist die Gravelmessung aufgrund ihrer Methodik nicht dazu geeignet, das Geräuschverhalten in einem Getriebe «vorherzusagen», weshalb eine werkstück- und strukturabhängige EoL-Messung erforderlich ist.

### 3. Kontinuierliches Wälzschleifen

Das kontinuierliche Wälzschleifen ist ein hochproduktives Hartfeinbearbeitungsverfahren mit geometrisch undefinierter Schneide. Die Paarung Werkstück-Werkzeug entspricht dabei kinematisch einer Schraubwälzpaarung unter windschiefer Achslage. Zur Erzeugung einer evolventischen Zahnform am Werkstück ist demnach ebenfalls ein evolventisches Profil am Werkzeug, welches auch als Schleifschnecke oder

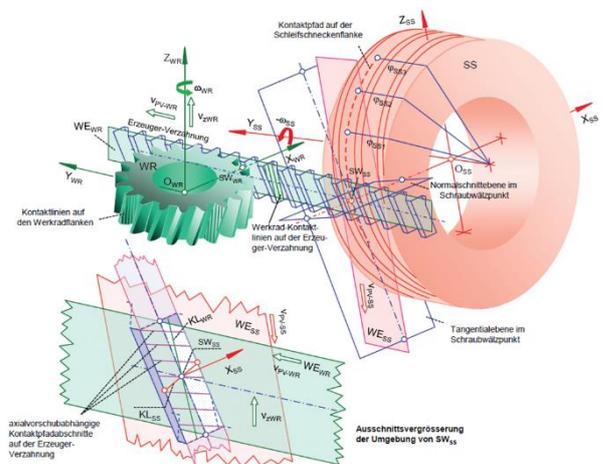
-scheibe bezeichnet wird, erforderlich. Daraus folgt, dass sich die räumliche Kontaktspur zwischen Werkstück und Werkzeug als die gemeinsame Schnittgerade zwischen den jeweiligen Tangentialebenen an den Grundkreisen von Werkstück und Schleifschnecke darstellt und den Schraubwälzpunkt kreuzen muss, siehe Abbildung 5.

Die Schnittbewegung ist die Bewegung zwischen Werkzeugschneide und Werkstück, die ohne Vorschubbewegung nur eine einmalige Spanabnahme während einer Umdrehung oder eines Hubes bewirken würde. Die kontinuierliche Spanabnahme entsteht durch den zusätzlich zur Schnittbewegung aufgebrachtten Axialvorschub (Z-Vorschub) und die Radialzustellung (X-Zustellung) bei kinematischer Koppelung der Werkstück- und Werkzeugachsen. Abbildung 4 zeigt Achskonzept und Kinematik des Verfahrens.



**Abbildung 4: Achskonzept und Kinematik des Wälzschleifprozesses**

Die Durchdringungen der Schleifschneckenangflanke mit der Werkstückflanke in den aufeinanderfolgenden Wälzstellungen hinterlassen auf der Werkstückflanke längliche Kontaktzonen, die in der nächsten Werkstückumdrehung wiederum teilweise weggeschnitten werden. Die Kontaktspur auf der evolventischen Werkstückzahnflanke hat bei Schrägverzahnungen eine räumliche Ausdehnung in Zahnbreitenrichtung und stellt sich an linker und rechter Flanke punktsymmetrisch dar. Bei Geradverzahnungen fällt die geometrische Kontaktspur mit dem Werkstückstirnschnitt zusammen.



**Abbildung 5: Schraubwälzpaarung und Kontaktverhältnisse [4]**

#### 4. Einflüsse auf das Anregungsverhalten und Massnahmen für einen geräuscharmen Eingriff

##### 4.1 Mikrogeometrie der Verzahnung

Bereits durch geeignete Flankenmodifikationen kann die Geräuschanregung der Verzahnung bei spezifischen Lasten erheblich reduziert werden. Diese Modifikationen zielen darauf ab, die ungleichförmige Zahnsteifigkeit im Kontakt auszugleichen und vorzeitigen Eingriff zu vermeiden. Dies wird in der Regel durch Reduzierung der Verformung in der richtigen Eingriffsstellung erreicht. Herfür geeignete und in der Praxis breit bewährte Modifikationen sind z.B. Kopfrücknahmen, Balligkeiten in Profil und Flankenlinie oder Profilwinkelabweichungen. Diese sog. «Standardmodifikationen» sind durch grosse Modifikationsbeträge im Bereich von 3...50µm und einfache geometrische Formen gekennzeichnet, wodurch sie im industriellen Einsatz prozesssicher gefertigt werden können.

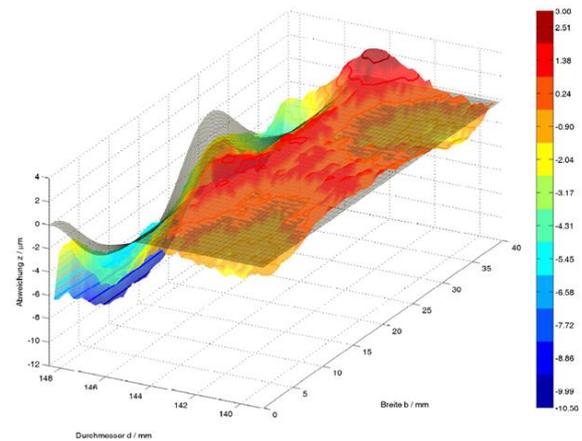
Die Nachteile der o.g. Standardmodifikationen stellen eine nur bedingte Beherrschbarkeit von Tragfähigkeit und Anregung sowie eine nur eingeschränkte Kontrolle über höherharmonische Anregungen dar und können durch sog. «Berührlinienwelligkeiten», auch «β<sub>b</sub>-Modifikationen» genannt, kompensiert werden. Dabei wird eine 3D-Wellenform appliziert, die sich entsprechend der räumlichen Kontaktverhältnisse unter dem Grundschrägungswinkel β<sub>b</sub> orientiert. Die Welle wird in ihrer Grundform durch den Zusammenhang [6, 7]

$$Z(\xi, \tau) = A \cdot \sin(2\pi \cdot \xi / \lambda + \phi) \quad \text{mit } \phi = f(\phi_0, \beta, \tau) \quad (1)$$

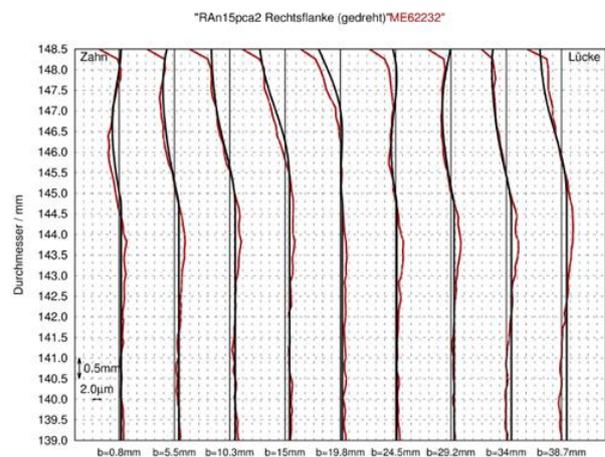
mit dem Profilparameter ξ und dem Breitenparameter τ ∈ [0, b] beschrieben. Die Amplituden solcher β<sub>b</sub>-Wellen betragen häufig nur A = 0.3...1.5µm. Die Phasenlage φ<sub>0</sub> ist von der Verzahnungsgeometrie abhängig und für die Wirkung der Berührlinienwelligkeit im Getriebe massgeblich.

Aufgrund der geringen Amplituden und komplexen geometrischen Form gestaltet sich ein prozesssicherer Einsatz unter industriellen Bedingungen schwierig. Hier können sog. «partielle Berührlinienwelligkeiten» Abhilfe schaffen, deren Gestalt sich nicht über die volle Zahnfläche, sondern nur über einen eingeschränkten Bereich der Zahnflanke erstreckt, was eine Vergrösserung der Amplitude ermöglicht, und damit den Vorteil einer besseren Herstellbarkeit mit sich bringt [6]. Die Auslegung solcher Modifikationen ist aktuell mit einer entsprechenden Software wie z.B. DZP [7] der FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.) möglich.

Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt exemplarisch die aus DZP [7] berechnete Form einer partiellen Berührlinienwelligkeit gegenübergestellt mit der auf einer Reishauer Verzahnungsschleifmaschine RZ260 gefertigten Geometrie.



a) 3D-Topographiemessung Profil

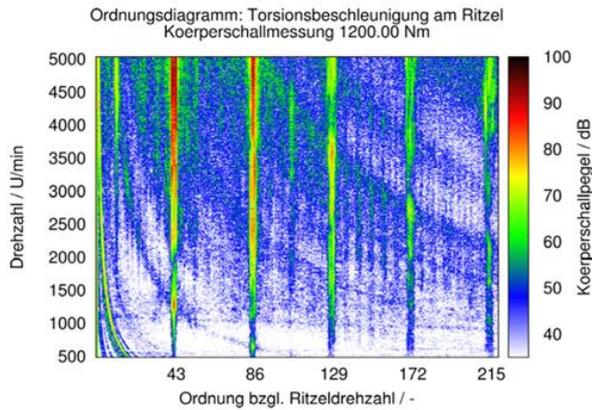


b) Profilmessung in 9 Stirnschnittebenen an einem Zahn (Soll-Ist)

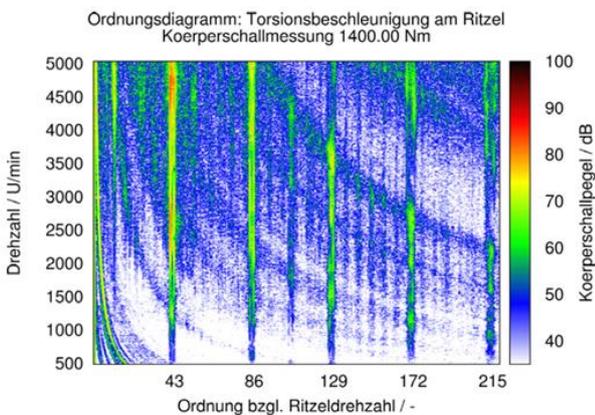
**Abbildung 6: partielle Berührlinienwelligkeit (periodische Kopfrücknahme) [6]**

In Kohn et al [6, 7] werden die Wirkweisen solcher Modifikationen auf einem NVH-Verspannungsprüfstand untersucht, siehe Abbildung 7. Dabei zeigt sich, dass gegenüber Standardmodifikationen, aber auch periodischen β<sub>b</sub>-Welligkeiten über der ganzen Zahnflanke, insbesondere exakt gefertigte bereichsweise Berührlinienwelligkeiten Vorteile in Bezug auf die Reduktion der 1. und 2. ZEO bei gleichzeitig unveränderter Tragfähigkeitscharakteristik aufweisen und die Amplituden dieser Ordnungen bei einer spezifischen Last sogar nahezu eliminieren können.

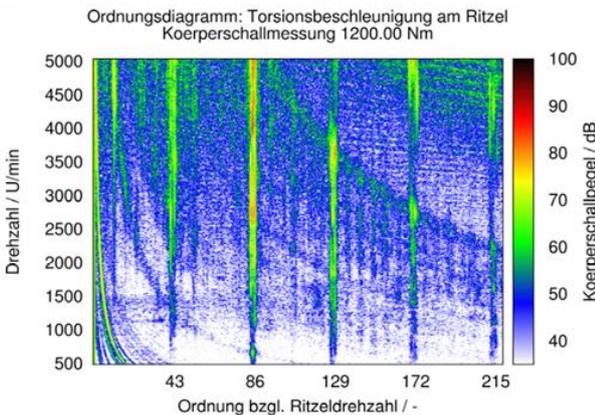
Die Herstellbarkeit von Berührlinienwelligkeiten erfolgt im Rahmen eines topologischen Wälzschleifprozesses durch eine zusätzlich zu den vorgestellten Standardmodifikationen vorgesehene Überlagerung einer geeigneten Abrichtkinematik. Der Einsatz unter industriellen Praxisbedingungen ist aufgrund der sehr hohen Anforderungen an die Prozessstabilität und der fehlenden Möglichkeiten einer prozesssicheren Messung aktuell nur eingeschränkt möglich.



a) nicht-anregungsoptimierte Referenz mit Standardmodifikationen



b) beste Standardmodifikation



c) periodische Kopfrücknahme  
**Abbildung 7: Einsatzverhalten verschiedener Modifikationen im NVH-Prüfstand [6]**

## 4.2 Einflüsse im Fertigungsprozess

### Schleifen mit optimalen Eingriffsverhältnissen

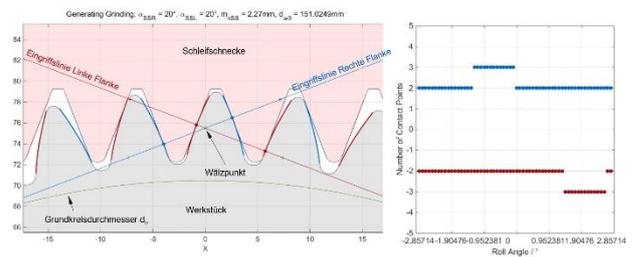
Das kontinuierliche Wälzschleifen ist ein hochproduktives, dynamisches Verfahren im Zweiflankenschleif, d.h. es werden beide Zahnflanken eines Zahnrades (und ggf. auch der Zahnfuß) gleichzeitig wälzend bearbeitet. Infolgedessen können Profilwelligkeiten infolge der periodischen Schwankung

der Zerspankraft während des Durchwälzens auftreten, bedingt durch die variable Anzahl der im Eingriff befindlichen Flanken während einer Wälzperiode sowie den Spanungskraftverlauf über der Wälzung einer Flanke. Die Wellenlänge dieser wälzungsbedingten Profilwelligkeit als Ergebnis einer erzwungenen Schwingung entspricht der Normaleingriffsteilung und tritt somit am Werkstück als Anregung mit Zahneingriffsordnung  $O = z$  (1. ZEO) auf. Diese Profilwelligkeiten werden ab einer bestimmten Amplitudengröße, die von der Getriebestruktur abhängig ist, im Getriebe bzw. auf dem EoL-Prüfstand geräuschauffällig.

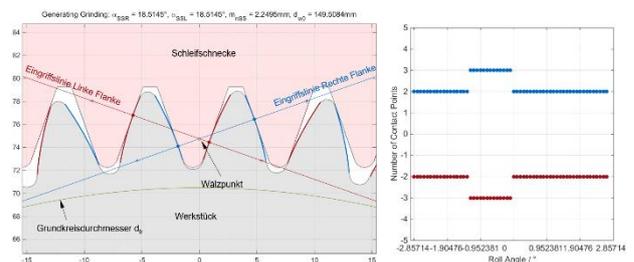
Zur Optimierung der Eingriffsverhältnisse wird hierzu der Herstellwälzkreis bzw. die Lage des Wälzpunktes derart verändert, dass in jeder Wälzstellung möglichst eine gleiche Anzahl von Eingriffspunkten auf beiden Flanken resultiert. Dadurch werden Unstetigkeiten im Zeitverlauf der resultierenden Kräfte beim Wälzschleifen reduziert. Mit der Bedingung

$$m_{nSS} \cdot \cos \alpha_{nSS} = m_{nWS} \cdot \cos \alpha_{nWS} \quad (2)$$

bleibt dabei die Eingriffsteilung mit dem Normalmodul  $m_n$  dem Eingriffswinkel  $\alpha_n$  zwischen Schnecke (Index SS) und Werkstück (Index WS) erhalten. Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die geometrischen Eingriffsverhältnisse mit und ohne Eingriffsoptimierung.



a) ohne Eingriffsoptimierung



b) mit Eingriffsoptimierung

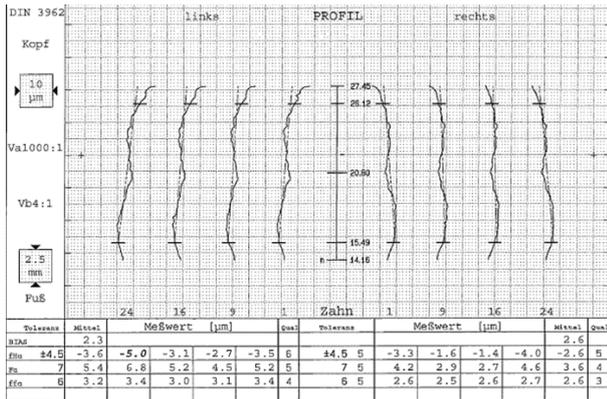
**Abbildung 8: Eingriffsverhältnisse Werkstück-Schleifschnecke (Projektion im Werkstückstirnschnitt)**

Infolge der Eingriffsoptimierung resultiert aus dem gleichzeitigen Eingriff auf beiden Flanken eine ausgeglichene Kontaktfolge. Kraftbedingte Verformungen der Zähne in der Spanabnahme werden dadurch «synchronisiert», wodurch geräuschrelevante Profilwelligkeiten unterdrückt werden. Abbildung 9 veranschaulicht am Praxisbeispiel den Einfluss der

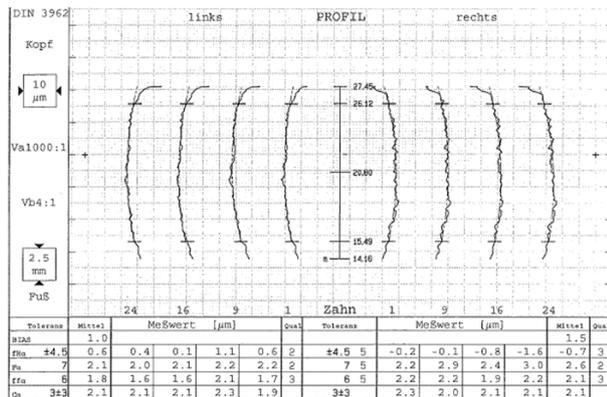
kraftbedingten, periodischen Schwankung der Zerspankraft mit und ohne Eingriffsoptimierung.

Profilabweichungen, die aus einer nicht ausgeglichenen Kontaktfolge der Berührungspunkte auf der linken und der rechten Flanke resultieren, können durch eine Optimierung der Eingriffsverhältnisse der Schleifschnecke beeinflusst werden.

Insbesondere bei kleinen Werkstückzähnezahlen (und damit geringer Gesamtüberdeckung beim Schleifen), wie z.B. Antriebsrotorwellen im E-Drive, ist diese Massnahme häufig zielführend.



a) ohne Eingriffsoptimierung (Profilwelligkeit)



b) mit Eingriffsoptimierung (Profilwelligkeit eliminiert)

Abbildung 9: Einfluss der Eingriffsverhältnisse in der Profilmessung

Low-Noise-Shifting

Neben technologischen Prozesseinflüssen spielt auch die erzeugte Oberflächenstruktur der Verzahnung eine wichtige Rolle für das Einsatzverhalten im Getriebe. Die Bearbeitung mit einer geometrisch undefinierten Schneide zieht eine kurzwellige Form der Welligkeit nach sich, wobei die Rauheitsstruktur vom Hartfeinbearbeitungsverfahren und insbesondere der Schnittrichtung abhängig ist. Bei den Schleifverfahren zeigen die Rauheitspeaks bzw. -valleys in Zahnbreitenrichtung.

Eine Oberflächenrauheit entspricht strukturell einer Oberfläche mit kurzwelligen Abweichungen (tonale Anregung), für Werkzeugeingriffswinkel  $\alpha_{ns} = 15...20^\circ$  sind Wellenlängen von ca. 0.5...0.7mm bzw. 1.1...1.5

mm zu erwarten [4]. Damit ergibt sich eine unmittelbare Anregungsrelevanz im Modulbereich von Modul 0.15...3.0 mm. Ausserdem führt eine Oberflächenrauheit zu einer Rauschanregung, deren Folge Schwingungen und damit Welligkeiten mit Frequenzen entsprechend der Resonanzfrequenzen im System Werkzeugmaschine-Werkzeug-Spannmittel-Werkstück sein können, und die sich als Profilwelligkeit am Werkstück abbilden.

Um die regelmässigen Strukturen auf der Oberfläche der Zahnflanken zu verändern, wurde zum Teil nach dem Schleifen noch das Honen als zweites Bearbeitungsverfahren ergänzt resp. häufig zwei Werkstücke aus unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren (z.B. Honen und Schleifen) im Getriebe miteinander gepaart. Aufgrund seiner geometrischen Eigenschaften (Werkzeugzähnezahl >> Werkstückzähnezahl) zieht das Honen hohe Profilgleitgeschwindigkeiten in der Bearbeitung nach sich, wodurch auf natürliche Weise eine NVH-günstige Oberfläche mit veränderlicher Winkellage der Bearbeitungsriefen erzeugt wird, siehe nachfolgende Abbildung 10 links.

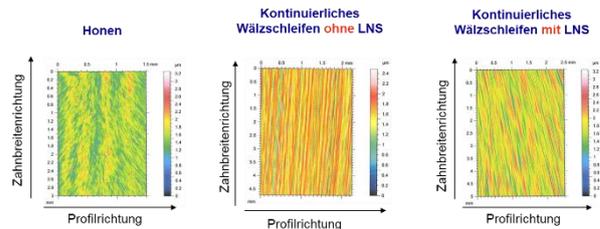
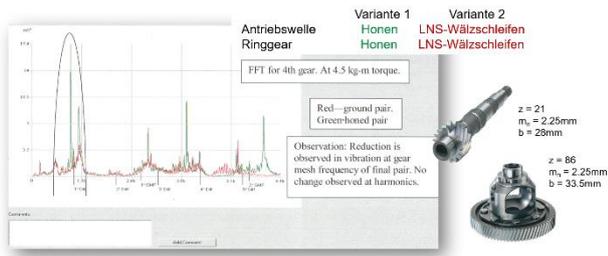


Abbildung 10: Oberflächenstrukturen aus unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren

Aufgrund der geometrischen Eigenschaften (Werkzeugzähnezahl << Werkstückzähnezahl) zieht das kontinuierliche Wälzschleifen hingegen niedrige Profilgleitgeschwindigkeiten in der Bearbeitung nach sich, wodurch sich die Bearbeitungsriefen coaxial zur Werkstückachse ausprägen und in ihrer Grundform eine periodische, ungebrochene Struktur aufweisen, die die Geräuschanregung begünstigt, siehe Abbildung 10 mitte.

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird auf Wälzschleifmaschinen der Fa. Reishauer AG das sog. «Low-Noise-Shifting LNS» eingesetzt: die stochastische Diamantverteilung auf den Arbeitsflächen der Diamant-Abrichtwerkzeuge wird beim Abrichten auf die Schleifschneckenflanken und anschliessend beim Wälzschleifen während des letzten Hubs von diesen auf die Werkstückflanken derart übertragen, dass die durchgängigen Schleifriefen in Zahnbreitenrichtung unterbrochen werden (siehe Abbildung 10 rechts) und nur noch kommaförmigen Charakter besitzen, so dass die Tonalität dieser Kurzwelligkeit aufgehoben wird. Der hierfür notwendige Y-Vorschub (Shiftvorschub) wird von der Maschinensteuerung berechnet und ist von Werkstück- und Prozessdaten abhängig. Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt die Wirkweise von LNS auf dem EoL. In diesem spezifischen Fall konnten die ZEO und deren Harmonische durch LNS gegenüber

Honen sogar noch weiter gesenkt werden.



**Abbildung 11: Vergleich des Getriebegeräusches anhand zweier Hartfeinbearbeitungsverfahren**

Fein- und Polierschleifen

Mit dem Fein- und Polierschleifen wird neben der Verbesserung der Tragfähigkeit und der Reduzierung der Verlustleistung der Verzahnung das Ziel verfolgt, die aus der Oberflächenrauheit resultierende Gesamtanregung zu reduzieren bzw. zu beseitigen. Beim Feinschleifen werden dabei eine keramisch gebundene Schrapp- und keramisch gebundene Feinschleifscheibe miteinander kombiniert. Beim Polierschleifen wird die keramisch gebundene Schrapp- mit einer kunstharzgebundenen Polierscheibe kombiniert.



a) Reishauer-Feinschleifscheiben

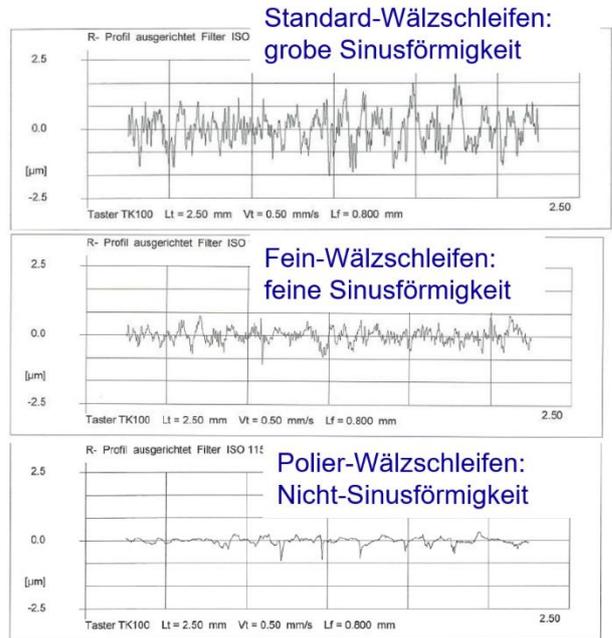


b) Reishauer-Polierschleifscheiben

**Abbildung 12: Mehrbereichsscheiben zur Oberflächenoptimierung**

Die Reduzierung der aus der Oberflächenrauheit resultierenden Gesamtanregung erfolgt durch die Verringerung der Oberflächenwelligkeit infolge der Schleifriefen beim Feinschleifen bzw. durch die Beseitigung einer sinusförmigen Ausbildung der Rauheitsstruktur beim Polierschleifen. Im Praxiseinsatz ist der positive Effekt von poliergeschliffenen Oberflächen auf das NVH-Verhalten im Getriebe aufgrund der hohen Komplexität immer vom Einzelfall abhängig. Darüber hinaus verstärkt die Vermeidung der Rauschanregung die Geräuschanregung infolge

nichtoptimaler Flankenmodifikationen. Abbildung 13 veranschaulicht die auftretende Sinusförmigkeit in den Rauheitsmessschrieben je nach Fertigungsverfahren.



**Abbildung 13: Rauheitscharakteristik von Wälz-, Fein- und Polierschleifen**

**5. Reishauer-Monitoringsystem «ARGUS»**

Aufgrund der hohen Teileausbringung aus dem kontinuierlichen Wälzschleifprozess können in der industriellen Praxis in der Regel nicht alle gefertigten Werkstücke unter wirtschaftlich vertretbaren Gesichtspunkten taktil gemessen werden. Gleichzeitig wird aufgrund der wachsenden Qualitätsansprüche im Zuge der E-Mobilität der Wunsch nach einer 100%-Messung laut, damit Geräuschauffälligkeiten bereits während oder unmittelbar nach der Verzahnungsbearbeitung detektiert werden. Mit den heute typischen Stichprobenanalysen besteht das Restrisiko, qualitativ schlechte Werkstücke in ein Getriebe zu verbauen.

Vor diesem Hintergrund wird bei der Fa. Reishauer AG das Prozess- und Komponenten-Monitoringsystem «ARGUS» entwickelt. Hierzu wird die Kenngröße «Schleif- bzw. Abrichtintensität», die sich gestützt durch ein technologisches Kraftmodell an den real auftretenden Belastungen während der Bearbeitung orientiert, herangezogen. Dieses Modell berücksichtigt unter anderem die Ausprägung der Spannungszone inklusive der lokalen Schnittkinematik bei Veränderung des Durchmessers der Schleifscheibe, die Veränderung der schleiftechnologischen Parameter wie beispielweise die Drehzahlen und die vorliegenden Hebelverhältnisse.

Dank einer Echtzeitanalyse dieses Signals kann noch während des Schleifprozesses ein fehlerbehaftetes Werkstück, bei entsprechender Grenzwertverletzung, identifiziert werden. Mittels vorhandener

Automatisierung der Fertigungskette werden diese Ausschussteile automatisch aus dem Produktionsvorgang ausgeschleust.

Die Ursache von grenzüber- oder -unterschreitender Schleifintensität könnte beispielsweise schwankendes Schleifaufmass auf den Zahnflanken oder ein zu hoher Härteverzug und die damit verbundene zu hohe Rundlaufabweichung sein. Durch die hinterlegte Normierung der Schleifkraft können bereits kleine Kraftschwankungen durch unterschiedliche Aufmasse am Rohteil erkannt und automatisch bewertet werden. Ein typischer Intensitätsverlauf für eine zweistufige Bearbeitung ist in Abbildung 14 zu sehen.

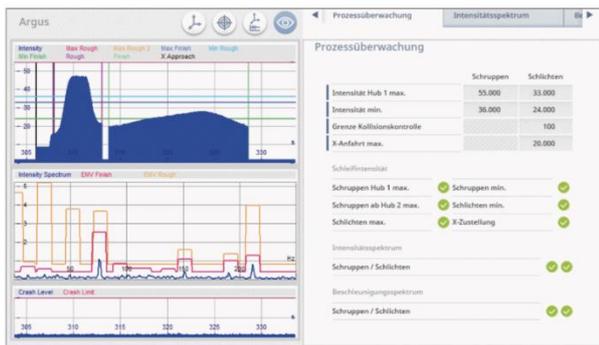


Abbildung 14: Verlauf der Schleifintensität bei einem zweistufigen Bearbeitungsprozess

Die Analyse der Schleifintensität ermöglicht eine verbesserte Beurteilung der Konstanz des Schnittverhaltens der Schleifschnecke über ihren Durchmesser- und Breitenbereich. Die Beurteilung von Schleifschnecken ist oft nur subjektiv möglich, da es meist an empirischen Werten fehlt und inhomogene Härteverläufe der Schleifschnecken nur indirekt über einbrechende Profilabweichungen der Werkstücke sichtbar werden. Mit dem «ARGUS»-Monitoringsystem wird eine Veränderung des Härteverlaufs einer Schleifschnecke messbar, wie in Abbildung 15 zu sehen.

Darin sind die Schleifintensitäten über der Position der Y-Achse bzw. entlang der Schneckenbreite bei ca. 5.300 Werkstücken visualisiert, wobei die obere Punktwolke den Schrupphub darstellt und die untere engere Punktwolke den Schlichthub. Beim Schrupphub ist von rechts nach links ein Abfall in der Schleifintensität festzustellen, der sich in einer gegenläufigen Zunahme der Schleifintensität beim Schlichten spiegelt. Das Abfallen der Schrupp-Intensität deutet auf einen prozessbedingten Verschleiss am Schleifwerkzeug hin. Das vorliegende abfallende Niveau der Schleifintensität resultiert demzufolge ausschliesslich aus einer zunehmenden mikroskopischen Zerstörung des Korngebändes der Schleifschnecke, was zu einem geringeren Materialabtrag an den Flanken des Zahnrades führt. Das geringe Ansteigen der Schleifintensität beim Schlichten deutet auf die Zunahme des Materialabtrags im Schlichthub hin, der den zunehmend geringeren Materialabtrag im vorangegangenen Schrupphub kompensieren muss. Dieser Effekt führte final auch zu

zunehmend ausgeschleusten Teilen, die unten links in der Punktwolke des Schruppens als dunkelrote Punkte erscheinen.

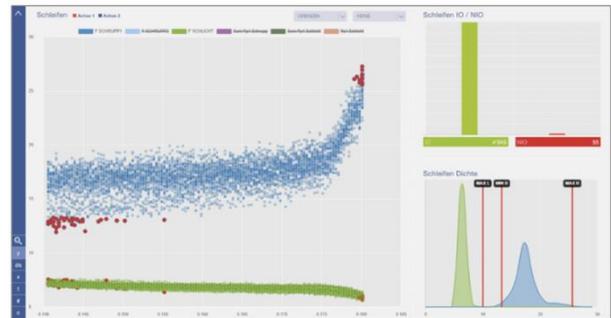


Abbildung 15: Veränderung des Härteverlaufs einer Schleifschnecke

Die Analyse der Schleifintensität ermöglicht unter anderem auch die Bewertung der Rundlaufgenauigkeit der Spannmittel bzw. der Rundlaufabweichung der Vorbearbeitung. Die nachstehende Abbildung 16 zeigt die Rundlaufabweichung von beiden Werkstückspindeln C<sub>1</sub> und C<sub>2</sub>, die sich im Drehturm der Schleifmaschine befinden. In der obigen Darstellung ist der Rundlaufindikator des ARGUS Systems visualisiert. Der Rundlaufindikator wird vom «ARGUS»-System unter Verwendung erprobter Algorithmen automatisch berechnet und ermöglicht so eine einfache Interpretation des Anteils der in diesem Beispiel diskutierten Rundlaufabweichung an den dynamischen Effekten während der Bearbeitung.

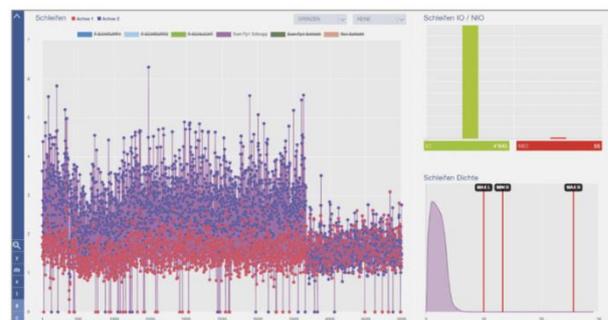


Abbildung 16: Rundlaufabweichungen bei einem Spannmittel

Die roten Punkte in Abbildung 16 verdeutlichen eine konstant kleine Prognose zur Rundlaufabweichung bezüglich der C-Achse 1 über ca. 5.300 Werkstücke. Der Verlauf des Rundlaufindikators für die Werkstückspindel C<sub>1</sub> (rot) zeigt eine typische, aus der Vorbearbeitungsqualität resultierende geringe Streuung. Die grösseren Beträge des Rundlaufindikators für die Werkstückspindel C<sub>2</sub> (blau) weisen auf eine Rundlaufabweichung des Spannmittels hin, das nach ca. ¾ der bearbeiteten Werkstücke rundgerichtet wurde und dann zu vergleichbar stabilen Prozessen auf beiden Werkstückspindeln führte. Eine konstante Erhöhung der Beträge des Rundlaufindikators kann sich nur aus einer

konstanten Eingangsgrösse, wie z.B. der Rundlaufabweichung des eingerichteten Spannmittels abbilden und könnte nur im Ausnahmefall durch konstant zu grosse Rundlaufabweichungen der Eingangswerkstücke erklärt werden. Die Vorbearbeitungsqualität liefert jedoch meist eine starke Streuung des Rundheitsindikators und kann bereits vor der Bearbeitung zu Ausschleusungen unzulässiger Werkstücke führen.

Neben der einfachen Interpretierbarkeit der «ARGUS»-Indikatoren bietet vor allem die Bewertung und Visualisierung grosser Fertigungslose, die nicht mehr ausschliesslich von teuren und hochausgebildeten Experten durchgeführt werden können, einen signifikanten Vorteil für den Anwender.

Das vom «ARGUS»-Prozessmonitoring verwendete skalare Datenformat ermöglicht problemlos die Darstellung verschiedener Kennwerte an tausenden von Messpunkten, während in akademischen Studien häufig mittels Zeit- und Frequenzbereichsanalysen auf grossen Datenmengen zurückgegriffen wird, die mehrere Gigabytes an Daten enthalten. Das «ARGUS»-Prozessmonitoring benötigt für die Analyse von Bearbeitungsprozessen keine besondere Auswertungs- und Hardware, so dass eine einfache Webapplikation in typischen Browsern genutzt werden kann. Dank der kleinen Datenmenge können alle Daten jederzeit via Internet oder in einem allgemeinen Netzwerk, auch mit kleiner Netzwerkbandbreite, effizient geladen werden

## 6. Fazit und Ausblick

Aktuelle Trends in der Verzahnungsentwicklung deuten im Zuge der voranschreitenden E-Mobilität auf immer höhere Ansprüche an die eingesetzten Verzahnungen hin, was eine enge Toleranzkette in der Hartfeinbearbeitung nach sich zieht. Diese enge Tolerierung ist massgeblich dem Einsatzverhalten der Verzahnung in einem E-Motive-Antriebsstrang geschuldet: das Geräuschverhalten von Verzahnungen tritt nun in den Vordergrund. Durch geeignete Massnahmen können die hochdrehenden Verzahnungen in einem Elektrofahrzeug als Geräuschquelle eingedämmt oder gar eliminiert werden.

Bereits bei der Auslegung der Mikrogeometrie gibt es mit den vorgestellten Berührlinienwelligkeiten ein geeignetes Werkzeug, um die Amplituden der ZEO und deren Harmonischen in einem gewissen Lastbereich zu senken. Mit Hilfe der entsprechenden Berechnungssoftware DZP [7] und mit einer hochgenauen CNC-Achsregelung können diese komplexen Wellenformen mit dem kontinuierlichen Wälzschleifen auch mit sehr kleinen Amplituden unter Einhaltung der geforderten Phasenlage gefertigt werden.

Prozessbedingte Abweichungen zur Sollgeometrie der Werkstücke infolge von periodisch wechselnden Kraftverhältnissen im Zweiflankenkontakt werden durch den Einsatz einer Schleifschnecke mit optimierten Eingriffsverhältnissen kompensiert. Dadurch kann insbesondere die 1. ZEO als dominante Welligkeitsform drastisch gesenkt werden.

Durch den Einsatz spezieller Shiftstrategien ist es möglich, die infolge der Schraubwälzkinematik beim kontinuierlichen Wälzschleifen auftretenden axialen Schleifriefen zu brechen. Dadurch wird in der Regel eine tonale Anregung unterdrückt, da die Periodizität in der Oberflächenstruktur gebrochen wird.

Durch den Einsatz mehrteiliger Schleifwerkzeuge, und insbesondere beim Polierschleifen, können sinusförmige Rauheitscharakteristiken durch Eliminierung der Rauheitsspitzen unterbrochen werden, wodurch neben der Steigerung von Flankentragfähigkeit und Verzahnungswirkungsgrad auch das Geräuschverhalten der Verzahnung positiv beeinflusst werden kann.

Diese beispielhaften Massnahmen sind technologische Hebel, die im kontinuierlichen Wälzschleifen von E-Motive-Verzahnungen zur Geräuschminderung zum Tragen kommen. Oftmals werden dabei die beschriebenen Technologien überlagert eingesetzt, um den bestmöglichen Effekt zu erzielen.

Mit dem «ARGUS»-Monitoringsystem der Fa. Reishauer AG ist es darüber hinaus möglich, eine Echtzeitbewertung sämtlicher Abrichtvorgänge sowie der Schleifprozesse auf der Reishauer Verzahnungsschleifmaschine vorzunehmen. Die während der Bearbeitung generierten Daten werden von «ARGUS» analysiert und hinsichtlich statischer und dynamischer Kriterien bewertet. Zahnräder mit qualitätsmindernden Geometrieabweichungen aus der Vorbearbeitung sowie potenziell geräuschkritische Zahnräder werden detektiert und aussortiert.

Mit den vorgestellten Technologien bietet die Reishauer AG als Global Player und Marktführer im Wälzschleifen von Verzahnungen sehr geeignete Werkzeuge, um die kommenden hohen Herausforderungen der E-Mobilität zu beherrschen. Intensive Weiterentwicklungen im Bereich der NVH-optimalen Bearbeitung von Verzahnungen, gepaart mit einer Digitalisierung der Prozesssteuerung, werden langfristig der Schlüssel für geräuscharme Getriebe sein.

## 7. Referenzen

- [1] Ahmad, M., 2017, Analyse des langwelligen Anregungsverhaltens schnelllaufender Getriebe für Elektrofahrzeuge, 58. Arbeitstagung „Zahnrad- und Getriebeuntersuchungen“ des WZL, RWTH Aachen
- [2] Kohn, B., Utakapan, T., Fromberger, M., Otto, M., Stahl, K., 2017, Flank modifications for optimal excitation behaviour, Forschung im Ingenieurwesen 81 (2-3), Seiten 65-71
- [3] Linke, H., 2010, Stirnradverzahnung, Carl Hanser Verlag München Wien, 2. Auflage, ISBN 978-3-446-41464-8
- [4] Reishauer AG, Kontinuierliches Wälzschleifen von Verzahnungen, Eigenverlag, 1. Auflage, ISBN 978-3-033-01447-3
- [5] Kahlenbley, T., 2020, Ursachen für Welligkeiten bei Stirnrädern und ihre Vermeidung, Dissertation Universität der Bundeswehr Hamburg

- [6] Stahl, K., Otto, M., Kohn, B., 2016, Abschlussbericht FVA 338/VI Optimale Flankenkorrekturen, Abschlussbericht
- [7] Stahl, K., Otto, M., Sepp, S., 2021, Abschlussbericht FVA 338/VIII Optimale Flankenkorrektur praxisnahe Verzahnung, Abschlussbericht