

Der Einfluss der Elektromobilität auf die Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen

Fabrice MONTI DI SOPRA¹, Walter GRAF²

¹ Reishauer AG, Wallisellen, Schweiz, fabrice.montidisopra@reishauer.com

² Reishauer AG, Wallisellen, Schweiz, walter.graf@reishauer.com

Zusammenfassung:

Der beschleunigte Wandel der Automobilbranche hin zur Elektromobilität, insbesondere zur vollelektrischen Mobilität mit BEVs (battery electric vehicles), stellt auch an die Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen zusätzliche und erhöhte Anforderungen. Die am Rad erforderliche Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik unterscheidet sich deutlich zwischen Verbrennungsmotoren oder Elektromotoren.

Zur Umsetzung neuer Getriebekonzepte werden deshalb nicht nur die geometrischen Dimensionen und Toleranzen der Verzahnungen angepasst, sondern auch die Anforderungen an Drehmomentübertragung, Lärmanregung, Lebensdauer und Rotationsgeschwindigkeit.

Die geometrischen Anforderungen können durch neue Fertigungsverfahren berücksichtigt werden. So kann eine Wälzschleifmaschine mit kleiner Schleifschnecke auslaufbegrenzte Verzahnungen oder Mehrfachverzahnungen auf einer Welle hochproduktiv schleifen, während grössere Innenverzahnungen präzise durch Hartwälzschalen bearbeitet werden können. Die Drehmomentübertragung, Lärmanregung, Lebensdauer und Rotationsgeschwindigkeit können durch eine Kombination aus Polierschleifen und verschränkungsfreiem Schleifen signifikant verbessert werden. Als flankierende Massnahmen können digitale Produkte wie Prozess- und Komponentenüberwachung sowie «closed-loop» die Qualität und die Produktivität weiter steigern.

Schlüsselwörter: Verzahnungsschleifen, Polierschleifen, Hartwälzschalen, Elektromobilität, Komponentenmonitoring, Prozessmonitoring

1. Einleitung

Der Wandel vom reinen Verbrennungsmotor (ICE) hin zu einem Mix aus Verbrennungsmotor, hybriden Antriebskonzepten (FHEV, MHEV, PHEV), Brennstoffzellen (FCEV) und vollelektrischen Fahrzeugen führt zu signifikanten Veränderungen bei den verwendeten Getriebekonzepten und somit auch bei den in den Getrieben eingesetzten Verzahnungen. Bei den BEVs sind insbesondere folgende vier Herausforderungen zu lösen:

1. der Wegfall kaschierender Motorengeräusche erfordert leisere Getriebe.
2. die grösseren Drehmomente der Elektromotoren bedürfen höherer Festigkeiten der Zahnflanken.
3. die größeren Drehzahlen verlangen nach besserer Verschleissbeständigkeit der Zahnflanken.
4. Der Bauraum für den gesamten Antriebsstrang soll wenn möglich kompakter werden.

Um diese 4 Herausforderungen anzugehen sind folgende Trends bei den Automobilherstellern und deren Lieferanten zu erkennen:

1. Zunahme auslaufbegrenzter Verzahnungen.
2. Zunahme grösserer Innenverzahnungen.
3. Erhöhte Anforderungen an Zahnflankenoberflächen und Zahnfestigkeiten.

Nach einem zusammenfassenden Kapitel zur Marktentwicklung der Elektromobilität für Automobile,

Trucks und Busse, werden in den darauffolgenden Kapiteln einige für die Elektromobilität relevante Neu- und Weiterentwicklungen bei der Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen vorgestellt.

2. BEV Markt- und Getriebeentwicklung

Die Prognosen und Pläne der Automobilbranche [1] zeigen einen beschleunigten Wandel hin zur Elektromobilität. Im Vergleich zu den Jahren 2020 und 2021 haben sich die Prognosen nur dahingehend verändert, dass der Anteil vollelektrischer Fahrzeuge insbesondere auf Kosten der Hybride zugelegt hat.

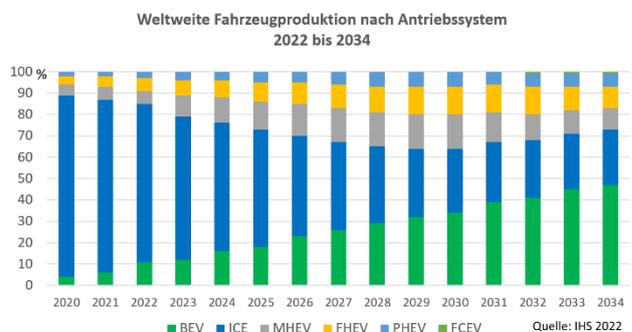


Abbildung 1: Prozentuale Verteilung der produzierten Antriebsstränge bei PKWs (Klassen 1 und 2 bis 6t Leergewicht) für die Jahre 2020 – 2034.

Häufig, wie auch in Abbildung 1, werden folgende Abkürzungen verwendet:

- BEV = Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug
- FCEV = E-Fahrzeug mit Brennstoffzelle
- FHEV = Vollhybrid-E-Fahrzeug
- ICE = Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
- MHEV = E-Fahrzeug mit milder Hybridisierung
- PHEV = Plug-in-Hybridfahrzeug

Auch bei den Bussen und Lastwagen ist der Trend zu einer diversifizierteren Energiesystemnutzung sichtbar [1]. Es wird erwartet, dass bis ins Jahr 2050 über 50% der produzierten Busse und Trucks «CO₂-neutral» angetrieben werden.

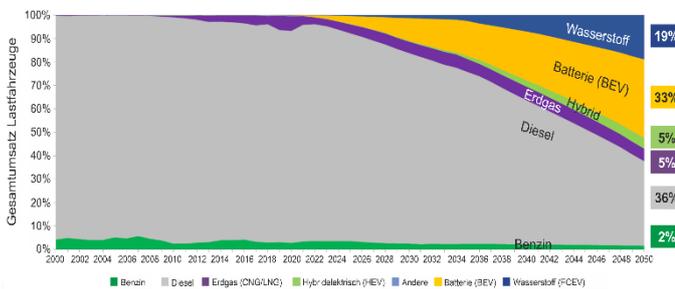


Abbildung 2: Verteilung der Energiesysteme in Bussen und Lastwagen (Klassen 4 bis 8) für die Jahre 2020 bis 2050.

3. Wälzschleifen auslaufbegrenzter Verzahnungen

Auslaufbegrenzte Verzahnungen oder Mehrfachverzahnungen auf einer Antriebswelle, die somit eine Störkontur aufweisen, verlangen nach angepassten Wälzschleifmaschinen für Schleifschnecken mit kleinerem Durchmesser.

Auf der Maschinenseite bedeutet dies, Schleifköpfe mit hohen Spindeldrehzahlen zu entwickeln, um die Schnittgeschwindigkeit idealerweise bei bis zu 100 m/s zu halten. Um die Produktivität hoch und die Stückkosten tief zu halten, werden je nach Ausgangslage Korundschleifscheiben, abrichtbare CBN Schleifscheiben oder nicht abrichtbare CBN Schleifscheiben verwendet.

Zusätzlich müssen Mehrfachverzahnungen oft mikrometergenau zueinander ausgerichtet werden, ohne die Prozessnebenzeiten zu erhöhen, was hohe Anforderungen an hochpräzise, in die Maschinen integrierte Messlösungen erfordert.

Diese erweiterten Anforderungen können heute durch angepasste oder neu entwickelte Wälzschleifmaschinen sowie adaptierte Werkzeuge zum grössten Teil erfüllt werden. Ebenso können auf diesen Wälzschleifmaschinen topologische Prozesse oder Polierprozesse gefahren

werden.

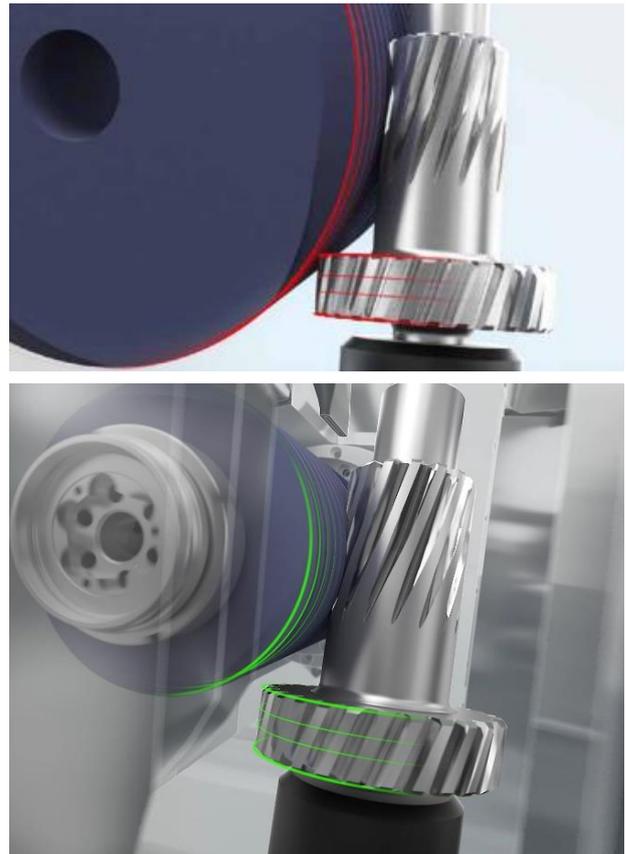


Abbildung 3: Wälzschleifen eines störkontur-behafteten Bauteils mit einer normalen Wälzschleifschnecke (oben) und einer kleinen Wälzschleifschnecke (unten) [2].

4. Hartwälzschälen von Innenverzahnungen

Die Zunahme an anspruchsvollen Innenverzahnungen stellt für Prozesse der Endbearbeitung ebenfalls eine Herausforderung dar. Unterschiedliche Prozesse wie Stossen, Honen, Innenwälzschleifen und Weichschälen werden heute produktiv eingesetzt, haben aber alle ihre Einschränkungen, entweder in der Qualität, in der Produktivität, in den Stückkosten oder weil nur ungehärtete Werkstücke bearbeitet werden können.

Zurzeit werden Innenverzahnungen von Automotivgetrieben weichgeschält und danach nitriert. Härteverzug muss bei dieser Methode in Kauf genommen werden, was negative Konsequenzen auf das Geräuschverhalten (NVH) der Zahnräder mit sich zieht. Alternative Methoden für die Hartfeinbearbeitung sind das Innenhonen und das Innenwälzschleifen. Diese beiden Methoden weisen Nachteile auf: Das Innenhonen kann Härteverzug nicht ausgleichen, da es zu geringes Materialabtragspotential aufweist. Das Innenwälzschleifen hat aufgrund der kleinen Schleifkörper und deren geringen Umfangsgeschwindigkeit zu kurze Standzeiten, was die

Abrichtfrequenz und auch die Kosten von Schleifwerkzeugen und der Bearbeitung erhöht.

Hart-Wälzschälen ist zurzeit die einzige wirtschaftlich vertretbare Hartfeinbearbeitung von gehärteten Innenverzahnungen.

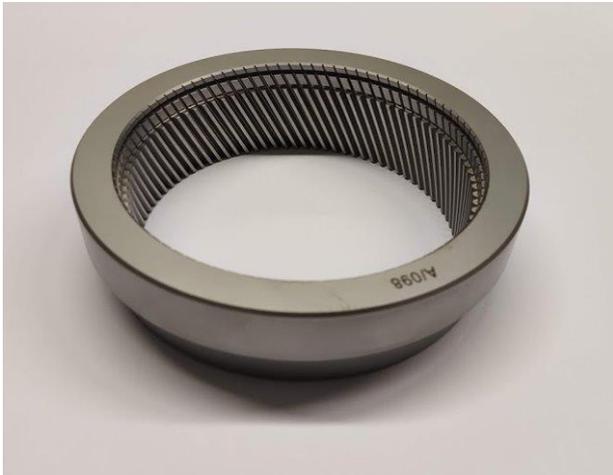


Abbildung 4: typische Innenverzahnung aus einem BEV-Getriebe.

Wälzschälen gibt es seit 1909 und trotzdem konnte es in Bezug auf die Hartfeinbearbeitung aufgrund von Mängeln der CNC-Software, der Steifigkeit der Werkzeugmaschinen und dem wichtigsten Faktor, der unzureichenden Werkzeugstandzeit, nicht genug Anklang finden, da sogar Hartmetallwerkzeuge einem zu hohen Verschleiß unterliegen. Das Verfahren gilt daher vor allem bei kritischen Getrieben für E-Antriebe als unwirtschaftlich und qualitativ unzureichend. Ausserdem muss erwähnt werden, dass das Hartwälzschälen einsatzgehärtete Werkstücke benötigt, da nitrierte Werkstoffe, die derzeit für Innenverzahnungen verwendet werden, nicht bearbeitet werden können.



Abbildung 5: Hartwälzschälen einer Innenverzahnung auf der RZW300 4.0 der Firma Reishauer.

Mit einem auf Steifigkeit optimierten Maschinenkonzept und Wälzschälwerkzeugen mit patentierten, superharten Schneidkanten kann die erforderliche Prozessstabilität, Oberflächengüte und Formgenauigkeit für hochwertige E-Antriebszahnäder

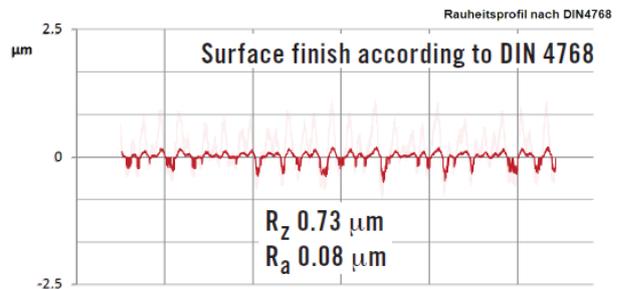
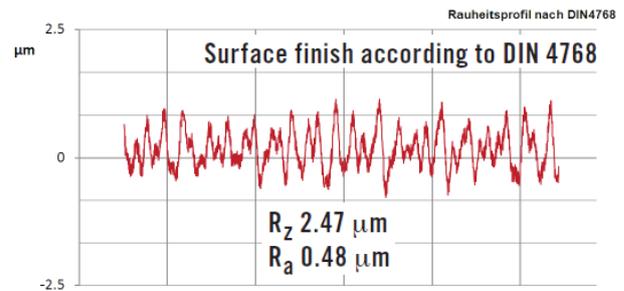


Abbildung 7: Oberflächenrauheit nach Wälzschleifprozess ohne Polierhub (oben) und mit Polierhub (unten). erreicht werden.

Neue Entwicklungen zeigen, dass Hartwälzschälen von Innenverzahnungen die Anforderungen an Produktivität, Stückkosten und Qualität erfüllt und im Vergleich zu alternativen Herstellprozessen Vorteile bringt.

5. Polierschleifen

Durch einen abschliessenden Polierhub mit einer Mehrzonenwälzschleifschnecke kann eine deutliche Verringerung der Oberflächenrauheit erreicht werden.



Abbildung 6: Wälzschleifschnecke mit Polierbereich [3].

Während beim klassischen Wälzschleifen mit Schleifschnecken mit starr gebundenem Schleifkorn,

FEPA Korngrößen 80-180, ausgeprägte Rauheits-erhebungen und -riefen erzeugt werden, entfernt ein abschliessender Polierschleifhub mit Schleifscheiben mit elastisch gebunden Feinkörnungen, Korngrösse 800 nach FEPA, die Rauheitserhebungen und es bleiben nur die Rauheitsriefen zurück, die dem Transport des Schmierstoffs dienen [4].

Die reduzierte Oberflächenrauheit führt zu einer Verringerung der mittleren Verzahnungsreibungszahl von bis zu 12 % gegenüber konventionell oder feingeschliffenen Verzahnungen [5]. Im Getriebe äussert sich dies durch eine bessere Gesamtgetriebeeffizienz und 3°C tieferen Temperaturen unter Last.

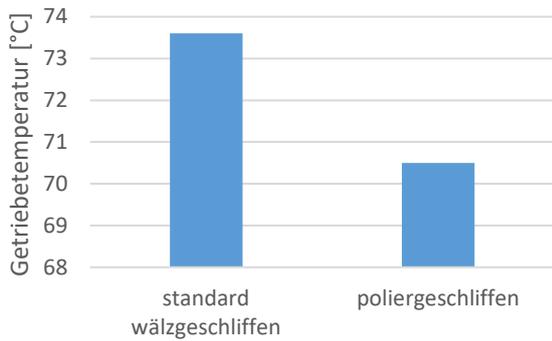


Abbildung 8: Getriebetemperatur unter einer Last von 1350 [N/mm²] auf dem Getriebeteststand des FZG der TU München.

Die dauerhafteste Flankenpressung wird um bis zu 25% erhöht [5], was generell zu einer verbesserten Lebensdauer des Getriebes führt, weil zum Beispiel damit die Grübchentragsfähigkeit erhöht wird. Die verlangsamte Alterung und Degradation der Verzahnungen können durch einen Dauertest nachgewiesen werden.

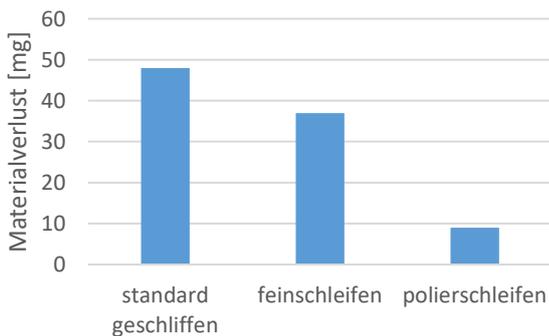


Abbildung 9: Vergleich des Materialverlusts in einem 100'000km Test unter Last auf dem Prüfstand des FZG der TU München.

Bei einem simulierten 100'000km Test mit konstanter Last aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten konnte gezeigt werden, dass der verschleissbedingte Materialabtrag an den Zahnflanken signifikant reduziert werden kann. Bereits feingeschliffene Verzahnungen

zeigen 20% bessere Resultate, während bei poliergeschliffenen Verzahnungen sogar eine 80% Reduktion erreicht werden konnte.

Eine Kombination von Kugelstrahlen mit anschliessendem Polierschleifen hat die Zahnfußfestigkeit um 18% erhöht [5]. Dieser in der Reihenfolge zu heute üblichen leicht umgestellte Herstellprozess kann zum Beispiel höhere Drehmomente bei gleichem Baumass ermöglichen.

6. Verschränkungsfrei Schleifen

Bei allen Zahnflankenschleifverfahren entsteht eine natürliche Verschränkung der Zahnflanke. Die Verschränkung ist als ein «Verzerrung» der Zahnflanke zu verstehen, die die Kontaktfläche bei zwei sich kämmenden Zahnräder verkleinert. Aufgrund dieser Verkleinerung wird die Last nicht ideal über die sich kämmenden Zahnflanken verteilt. In der Vergangenheit wurde diese Verzerrung in Kauf genommen und durch grösser ausgelegte Zahnräder kompensiert. Im Zuge der Elektrifizierung der Antriebe werden leichtere Bauweisen gefordert, die aber trotzdem den hohen Drehmomenten von E-Antrieben standhalten. Aus diesem Grund hat Reishauer das TwistContolGrinding (TCG), das verschränkungsfreie Schleifen entwickelt, um die mögliche Kontaktfläche der Zahnradpaarung optimal auszunutzen und den Getriebedesignern eine leichtere Bauweise zu ermöglichen.

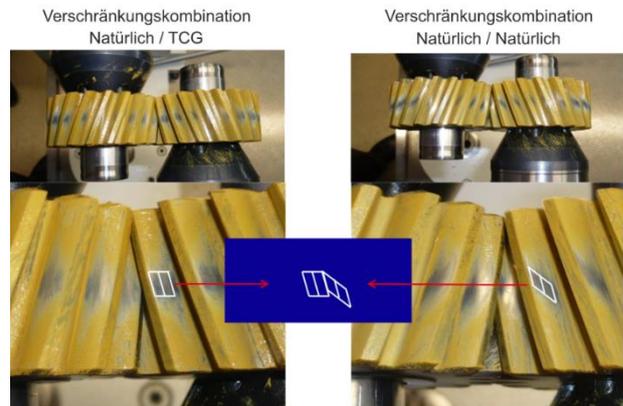


Abbildung 10: Verschränkungskombinationen natürlich/natürlich (rechts) sowie natürlich/TCG (links).

Um zu zeigen, warum sich das verschränkungsfreie Schleifen lohnt, wurde das Tragbild eines Zahnrads näher untersucht. Zu diesem Zweck wurden ein Zahnrad mit natürlicher Verschränkung aus dem Wälzschleifen und ein Zahnrad mit TCG geschliffen. Diese beiden Zahnräder wurden getrennt mit demselben Gegenrad gepaart, welches mit kontinuierlichem Wälzschleifen mit natürlicher Verschränkung geschliffen wurde. Die daraus resultierenden, unterschiedlichen Tragbilder sind in Abbildung 10 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Tragbild bei der Paarungsvariante mit dem angewandten TCG weniger schräg ausfällt. Außerdem ist

bei dieser Paarungsvariante (Abbildung 10 rechts) das Tragbild breiter über beide Zahnflanken verteilt ist. Durch dieses breitere Tragbild kann die Drehmomentbelastung der Zahnradpaarung auf einer größeren Flankenfläche verteilt werden, so dass einzelne Punkte der Flanke weniger stark belastet werden, was insgesamt eine erhöhte Tragfähigkeit bedeutet.

Das TCG Verfahren erlaubt auch das Schleifen einer gezielten Verschränkung, zum Beispiel das Schleifen einer Gegenverschränkung, um der natürlichen Verschränkung eines Zahnrades entgegenzuwirken und die Kontaktfläche einer Radpaarung optimal auszulegen.

7. Prozess- und Komponentenmonitoring

Die hohe Produktivität des kontinuierlichen Wälzschleifprozesses lässt eine wirtschaftliche 100% Prüfung der bearbeiteten Werkstücke nur in sehr seltenen Fällen zu. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen und die qualitativ hohen Anforderungen der E-Drive-Verzahnungen noch sicherer zu erfüllen, wurde zusätzlich zu den bereits beschriebenen Massnahmen ein flankierendes, ergänzendes, digitales Produkt entwickelt.

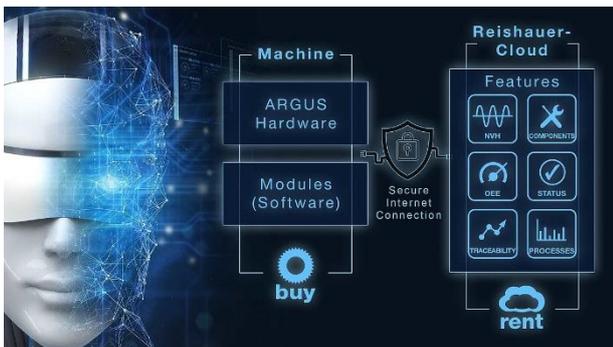


Abbildung 11: Reishauer ARGUS Komponenten- und Prozessmonitoringsystem.

Schleifen – im Gegensatz zu Drehen und Fräsen – ist gemäss dessen DIN-Definition ein Bearbeitungsprozess mit undefinierter Schneide. Daraus wird oft abgeleitet, dass auch der Schleifprozess undefinierbar bleibt. Auch der komplexeste Schleifprozess, wie ihn das kontinuierliche Wälzschleifen von Verzahnungen darstellt, ist mithilfe eines Prozessmonitoring-Systems definierbar. Das hier vorgestellte System erfasst die Abricht- und Schleifintensität mittels intelligenter Echtzeit-Datenverarbeitung und erprobter Algorithmen. Unter der Schleifintensität versteht Reishauer ein dem Prozess zugrunde liegendes Kraftmodell zur Normierung der Schleif- und Abrichtkräfte. Dank der Prozessinteraktion werden, unter Berücksichtigung eingestellter Bewertungsgrenzen, grenzüber- oder -unterschreitende Werkstücke automatisch ausgeschleust und ermöglicht potenziell eine Null-Fehler-Produktion. Die Abricht- und Schleifprozessdaten werden jedem einzelnen Werkstück und den Schleif- und Abrichtwerkzeugen zugeordnet und in einer Cloud-basierten Datenbank abgelegt, bleiben somit hundertprozentig rückverfolgbar und ermöglichen

umfassende Analysemöglichkeiten.

Es muss erstens sichergestellt werden, dass durch ein sensibles Komponentenmonitoring der Maschinenzustand zu jedem Zeitpunkt bekannt ist und dass insbesondere jede Veränderung des Zustandes unmittelbar festgestellt und allenfalls automatisch kompensiert werden kann. Zweitens müssen die Prozessreproduzierbarkeit garantiert und Abweichungen erkannt oder automatisch kompensiert werden, dies zum Beispiel durch automatische Anpassung der Anzahl Schleifhübe oder adaptiver Regelung der Vorschubgeschwindigkeit.

Eine detailliertere Beschreibung unseres Prozess- und Komponenten-Monitoringsystem ARGUS mit seinen für die BEV-Antriebe relevanten Funktionen ist zu finden in [6, 7, 8].

8. «Regelkreise» beim Wälzschleifen von Verzahnungen

Neben der in ARGUS nahezu in Echtzeit ablaufenden Überwachung und Regelung, gewinnen auch andere qualitätsrelevanten «Regelkreise» an Wichtigkeit, die zum Teil unter dem nicht sehr spezifischen Begriff «closed loop» fungieren. In der Folge sind kurz einige mögliche, relevante «Regelkreise» beschrieben. Als Voraussetzung sei nochmals erwähnt, dass eine 100% Prüfung der bearbeiteten Werkstücke nicht wirtschaftlich ist und weiter, dass der Hartfeinbearbeitungsprozess häufig der finale Prozess vor dem Einbau der Verzahnungen ins Getriebe ist. Es können somit mehrere «Regelkreise» umgesetzt werden, die alle direkt auf den OEE des Kunden einen Einfluss haben können:

1. Die Wälzschleifmaschinen werden typischerweise mit Werkstücken bestückt, die keine vorgängige, verzahnungsgeometrische Qualitätsprüfung erfahren haben. Ein erster «closed loop» ist somit die schnelle 100% Prüfung von Aufmass und/oder Härteverzug, mit anschliessendem, werkstückspezifisch angepasstem Schleifprozess.
2. Ein zweiter, deutlich langsamerer «Regelkreis» kann zwischen der Wälzschleifmaschine und einem Verzahnungsmessgerät aufgebaut werden. Dieser Regelkreis hat aber keine 100% Prüfung zum Ziel, sondern dient einem schnellen Einricht- und Freifahrprozess, sowie einem produktionsbegleitenden, periodischen Qualitätssicherungsprozess. Der Regelkreis beschränkt sich hier auf einen normierten (VDI/VDE 2610 GDE) Datenaustausch zwischen der Schleifmaschine und dem Messgerät, sowie einer (halb-) automatisierten Schleifprozessanpassung aufgrund der Messresultate.
3. Zwischen der Schleifmaschine und dem End-of-Line Getriebeprüfstand kann ein dritter «Regelkreis» aufgebaut werden. Dieser könnte zum Beispiel Geräuschanregungen im Getriebe zurückkoppeln an die Schleifmaschine und dort zu automatischen Anpassungen geräuschrelevanter

Schleifparameter führen.

Im Bereich «closed-loop» befindet sich das Verzahnungswälzschleifen in einer sehr dynamischen Phase. Das Potenzial wurde erkannt und einzelne Initiativen werden durch einzelne Firmen vorangetrieben, andere hingegen werden sehr strukturiert und klar normiert für die ganze Branche eingeführt.

9. Fazit

Die Elektromobilität beeinflusst zunehmend auch die Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen. Die Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik unterscheidet sich zwischen Verbrennungsmotoren oder Elektromotoren und dadurch müssen Drehmomentübertragung, Lärmanregung, Lebensdauer und der Drehzahleinfluss den neuen Gegebenheiten angepasst werden. Folgende Lösungen wurden kurz skizziert:

- Verzahnungen mit Störkontur können mit einer Kombination aus kleinerer Wälzschleifschnecke und adaptierter Wälzschleifmaschine wirtschaftlich und in der geforderten Qualität bearbeitet werden.
- Für die hochqualitative Hartfeinbearbeitung von Innenverzahnungen wird auf den Schälprozess zurückgegriffen. Der wirtschaftliche Erfolg dieses Prozesses hängt insbesondere von den Werkzeugstückkosten ab, die durch die Verwendung spezieller, patentierter Werkzeuge mit superharten Schneiden erreicht werden können.
- Polier- und TCG-Schleifen tragen dazu bei, dass eine hohe Drehmomentübertragung, eine geringe Lärmanregung und eine längere Lebensdauer auch bei höheren Drehzahlen erreicht werden können, und dies bei einer insgesamt besseren Gesamteffizienz.
- Prozess- und Komponentenmonitoring zur Sicherstellung der Produktionsstabilität, sowie «closed-loop» als integrierte «Regelkreise» zu nachgelagerten Qualitätssicherungsprozessen garantieren dabei eine hohe OEE, trotz enger Werkstücktoleranzen.

Die Entwicklung ist mit diesen Massnahmen aber bei Weitem noch nicht abgeschlossen. Einerseits kann die Zahnflankengeometrie weiter optimiert werden, um unter unterschiedlichen Lastverhältnissen noch bessere Eingriffsverhältnisse zu bieten, und andererseits ist das Potenzial digitaler Produkte wie ARGUS, aber auch integrierter «closed-loop»-Lösungen erst im Ansatz bekannt, entwickelt und genutzt.

10. Referenzen

- [1] IHS Markit Powertrain Production Forecast, February 2022.
- [2] <https://www.reishauer.com/maschinen/automobil-maschinen/rz-160-kws-40>
- [3] Wendt, L.: Aktuelle Entwicklungen beim Verzahnungswälzschleifen. Schweizer Schleif-Symposium, Zürich (2016).
- [4] Graf, W.: Polish Grinding of Gears for Higher Transmission Efficiency. Proceedings of the AGMA Fall Technical Meeting 2015 10 (2016).
- [5] Stahl, K., Tobie, T., Kratzer, D., Wendt, L., 2022, Abschlussbericht FVA 521/III Tragfähigkeit und Verlustleistung poliergeschliffener Zahnräder geringer Oberflächenrauheit, Abschlussbericht.
- [6] Monti di Sopra, F., CTI Symposium, Novi USA, 2022.
- [7] Dietz, C., Graf, W., Making Gear Grinding Transparent, Gear Technology, 2022.
- [8] Zimmer, M.: Die Bedeutung der E-Mobilität für das Wälzschleifen von Verzahnungen mit Fokus auf das Geräuschverhalten im Getriebe. Schweizer Schleif-Symposium, Zürich (2022).