


LÄPPEN ODER SCHLEIFEN? – WELCHE TECHNOLOGIE IST IN ZEITEN VON INDUSTRIE 4.0 DIE RICHTIGE WAHL?



Kegelrad-Getriebe für die Automobilindustrie unterliegen höchsten Anforderungen: Diese müssen immer höhere Leistungen bei sinkendem Gewicht und Bauraum übertragen können. Dabei werden hohe Ansprüche an die Geräuschqualität und zunehmend an den Wirkungsgrad gestellt. Bereits bei der Dimensionierung der Kegelrad-Verzahnung fällt die Entscheidung, ob die Verzahnung geläppt oder geschliffen wird. Häufig entscheidet der vorhandene Maschinenpark, welche Technologie verwendet wird. Dennoch sollte die Frage „Läppen oder Schleifen?“ nicht nur bei Neuinvestitionen gestellt werden, da es Vor- und Nachteile bei beiden Verfahren gibt.

Die Fertigungstechnik vollzieht aktuell einen Wandel, der in der Industrie und in der Wissenschaft mit dem Begriff Industrie 4.0 bezeichnet wird.

Fertigungsprozesse müssen sich steigenden Anforderungen nach Flexibilisierung und Selbstoptimierung stellen. Die Voraussetzung ist, dass Informationen aus den Prozessen gewonnen und direkt durch Produktionssysteme verarbeitet werden können. Vor dem Hintergrund dieser Debatte um den Nutzen von Industrie 4.0 lohnt es sich, eine alte Frage in der Kegelrad-Fertigung neu zu diskutieren: „Sollen Kegelräder geläpft oder geschliffen werden?“

Auf den ersten Blick unterscheiden sich die Prozessketten geschliffener und geläppter Kegelrad-Verzahnung nur in der Hartfeinbearbeitung. Die durch Wälzläppen erreichbaren Geometrieänderungen sind deutlich geringer als beim Verzahnungsschleifen. Folglich ist die Endqualität des geläpften Kegeltriebs in viel stärkerem Maß vom Ergebnis der vorangegangenen Prozessschritte

Die Endqualität eines geläpften Kegeltriebs hängt sehr viel stärker von den vorangehenden Prozessschritten ab als bei geschliffenen Verzahnungen.

te abhängig. In der Fertigung bedeutet das deutlich höhere Aufwendungen für die Optimierung der Bauteil-Qualität beim Verzahnungsfräsen. Darin eingeschlossen ist das Vorhalten von Geometrieänderungen, die durch die Wärmebehandlung, meist Einsatzhärten, hervorgerufen werden. Die sogenannte Härteverzugskompensation ist erforderlich, weil diese Verzüge nur in geringem Maß durch das Läppen korrigiert werden können. Anders bei geschliffenen Verzahnungen: Aufgrund der im Vergleich zum Läppen deutlich höheren Materialabträge können deutlich größere Beträge von Härteverzügen eliminiert werden.

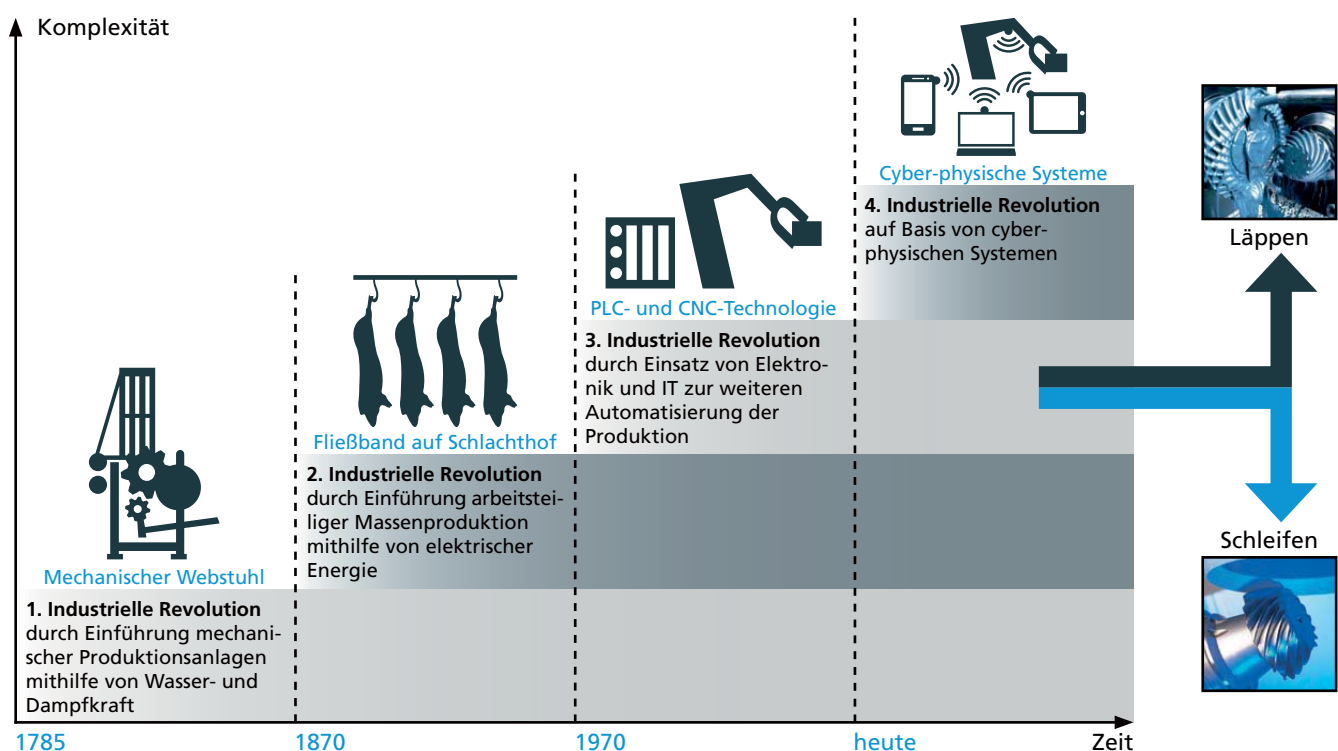


Abb. 1: Schleifen oder Läppen: eine Fragestellung im digitalen Zeitalter von Industrie 4.0

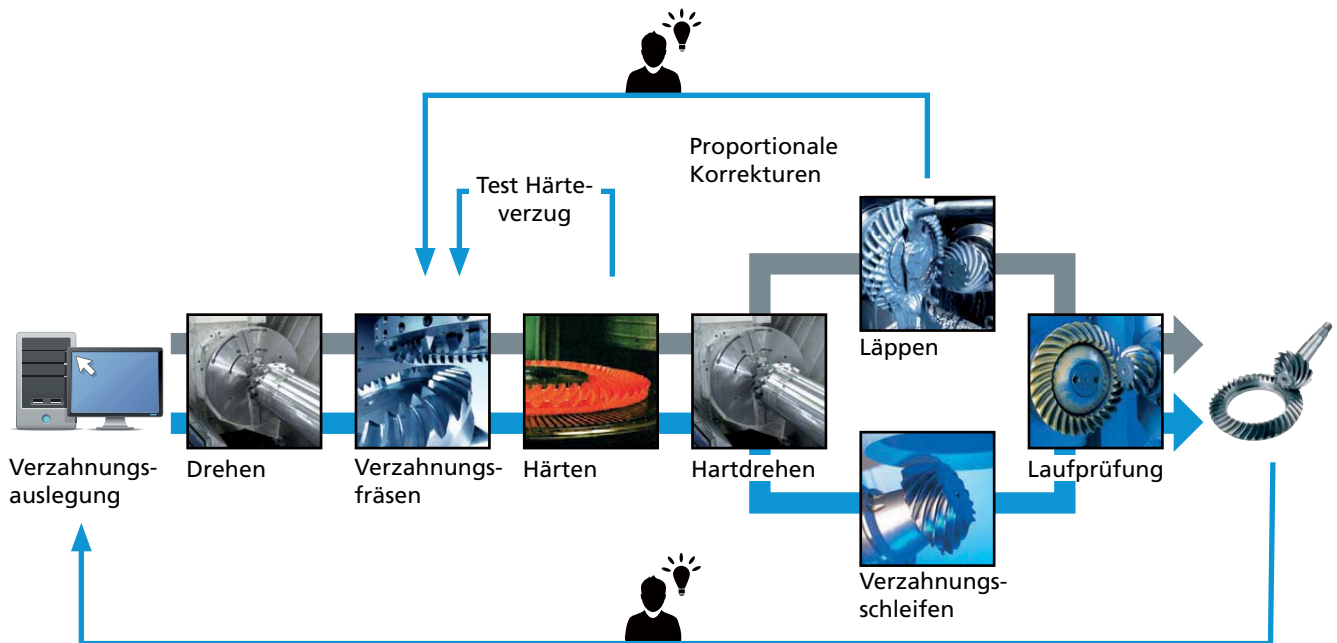


Abb. 2: Herkömmliche Prozesskette Kegelrad-Fertigung

Merkmale geläppter Kegelrad-Verzahnungen

Aufgrund der kürzeren Verzahnzeiten werden geläppte Verzahnungen in der Großserie in der Regel im kontinuierlichen Verfahren (Face Hobbing) hergestellt. Kennzeichnend für diese Verzahnungen: eine konstante Zahnhöhe von der Zehe bis zur Ferse und eine Zahnlangskurve in Form einer Epizykloide. Daraus resultiert eine sich verringern- de Lückenweite von der Ferse zur Zehe.

Beim Kegelrad-Läppen erfährt das Ritzel eine größere Geometrieänderung als das Rad, da das Ritzel aufgrund der geringeren Zähnezahl mehr Eingriffe pro Zahn erfährt. Der Materialabtrag beim Läppen führt zu einer Reduzierung von Längs- und Höhenballigkeit – vornehmlich beim Ritzel – und zu einer damit verbundenen Reduktion des Drehfehlers. Im Ergebnis weisen geläppte Verzahnungen daher einen sanfteren Zahneingriff auf. Das Frequenzspektrum der Einflanken-Wälzprüfung ist gekennzeichnet durch vergleichsweise niedrige Amplituden der Harmonischen der Zahneingriffsfrequenz, begleitet von relativ hohen Ampli-

tuden in den Seitenbändern (Rauschen). Teilungsfehler werden beim Läppen nur geringfügig reduziert und die Rauheit der Zahnflanken ist größer als die geschliffener Verzahnungen. Charakteristisch für geläppte Verzahnungen ist, dass aufgrund der individuellen Härteverzüge jeder Zahn eine unterschiedliche Geometrie hat.

Merkmale geschliffener Kegelrad-Verzahnungen

In der Automobilindustrie werden geschliffene Kegelräder als Duplexverzahnungen ausgelegt. Geometrische Merkmale dieser Verzahnung sind eine konstante Lückenweite und eine von der Zehe zur Ferse zunehmende Zahnhöhe. Der Zahnfuß-Radius ist von der Zehe bis zur Ferse konstant und kann aufgrund der konstanten Lücken- grund-Weite maximiert werden. Dies führt in Kombination mit dem Duplexkegel zu einer sehr hohen Zahnfuß-Festigkeit. Signifikant im Frequenzverlauf sind die eindeutig erkennbaren Harmonischen der Zahneingriffsfrequenz, begleitet von kaum sichtbaren Seitenbändern. Für das Verzahnungsfräsen im einzelteilenden Verfahren (Face

Milling) stehen TwinBlades zur Verfügung. Die daraus resultierende hohe Anzahl an aktiven Schneiden steigert die Produktivität des Verfahrens auf ein sehr hohes Niveau, das mit dem kontinuierlich verzahnter Kegelrader vergleichbar ist. Das Kegelrad-Schleifen ist ein geometrisch exakt beschriebener Prozess, damit kann der Konstrukteur die finale Geometrie genau festlegen. Für die Gestaltung des EaseOffs stehen geometrische und kinematische Freiheitsgrade zur Verfügung, um das Laufverhalten und die Tragfähigkeit der Verzahnung zu optimieren. Die so generierten Daten sind die Basis für die Nutzung des Qualitätsregelkreises Closed-Loop, der wiederum die Voraussetzung für die Herstellung der genauen Sollgeometrie ist.

Die geometrische Exaktheit geschliffener Verzahnungen führt zu einer geringen Varianz zwischen der Zahngeometrie einzelner Zahnflanken. Die Teilungsqualität der Verzahnung kann durch das Kegelrad-Schleifen deutlich verbessert werden.

Einfluss der Hartfein-Bearbeitung auf die Triebatz-Entwicklung

Die Geometrie geläppter Verzahnungen ist das Ergebnis einer iterativen Entwicklung. Der Konstrukteur legt letztlich die finale Geometrie des Triebatzes nur bedingt fest, da bei geläpften Kegelrad-Verzahnungen die Streuung der Endqualität größer ist als bei geschliffenen Verzahnungen. Daraus resultiert, dass auch der Einfluss der Fertigung auf die Laufqualität ebenfalls größer ist als bei geschliffenen Kegelrad-Verzahnungen. Dies führt zu einer größeren Unsicherheit bei der Triebatz-Entwicklung, da der Konstrukteur stets den Fertigungseinfluss und die Qualität seiner Auslegung bewerten muss.

Die hohe Geometrietreue geschliffener Kegelrad-Verzahnungen führt dazu, dass bei der Triebatz-Entwicklung eine eindeutige Rückführung des Einsatzverhaltens der Verzahnung zur ausgelegten Geometrie möglich ist. Der Konstrukteur erhält ein ein-

deutiges Feedback, welche geometrische Abweichung zu einem schlechten Laufverhalten oder zu mangelnder Tragfähigkeit der Verzahnung führt – und gewinnt daraus Hinweise für eine optimierte Verzahnungsgeometrie.

Klingelberg Closed-Loop

Wichtiger Bestandteil der Prozesskette zum Schleifen von Kegelrädern ist der Qualitätsregelkreis Closed-Loop. Bei der Verzahnungsauslegung definiert der Konstrukteur eindeutig die Sollgeometrie der geschliffenen Verzahnung. Basis des Klingelberg Qualitätsregelkreises Closed-Loop sind ein virtueller Meister und eine virtuelle Verzahnmaschine: Auf dem Präzisionsmesszentrum werden die Abweichungen der geschliffenen Verzahnung gegenüber einem virtuellen Meister erfasst. Basierend auf dem Modell der virtuellen Verzahnmaschine werden aus den realen Abweichungen Korrekturdaten berechnet und der Schleifprozess angepasst. Damit beschreibt der Closed-Loop ein selbstoptimierendes System und ist ein gutes Beispiel für Industrie 4.0.

In der Prozesskette geläppter Verzahnungen wird der Closed-Loop ebenfalls zur Qualitätsoptimierung der gefrästen Verzahnung verwendet. Im Vergleich zur Prozesskette der geschliffenen Verzahnung existiert aber keine virtuelle Beschreibung des Läppprozesses. Daher ist auch keine Selbstoptimierung des Kegelrad-Läppprozesses mit einem virtuellen Meister möglich. Der Bediener ist beim Läppen nach wie vor ein elementarer Bestandteil des Qualitätsregelkreises.

LÄPPEN VERSUS SCHLEIFEN

Geläppte

Kegelrad-Verzahnungen

- Konstante Zahnhöhe von der Zehe bis zur Ferse
- Verringerte Lückenweite von der Ferse zur Zehe
- Zahnlängskurve in Form einer Epizykloide
- Sanfterer Zahneingriff
- Niedrige Amplitude der Harmonischen der Zahneingriffsfrequenz
- Hohe Amplitude in den Seitenbändern
- Jeder Zahn weist eine unterschiedliche Geometrie auf

Geschliffene

Kegelrad-Verzahnungen

- Von der Zehe zur Ferse zunehmende Zahnhöhe
- Konstante Lückenweite
- Zahnfuß-Radius ist von der Zehe bis zur Ferse konstant und kann maximiert werden. Das erhöht die Zahnfuß-Festigkeit
- Eindeutig erkennbare Harmonische der Zahneingriffsfrequenz
- Kaum sichtbare Seitenbänder

Geschliffene Verzahnungen sind exakter. Das führt zu einer geringeren Varianz zwischen der Zahngeometrie einzelner Flanken.

Industrie 4.0: Klingelberg Closed-Loop ist beim Schleifen von Kegelrädern ein selbstoptimierendes System.



Abb. 3: Prozesskette Kegelrad-Fertigung im Closed-Loop

In der Produktionskette geschliffener Kegelrad-Verzahnungen sind alle Klingelberg Verzahnmaschinen mit der Produktionsdatenbank vernetzt. Der Closed-Loop für das Kegelrad-Fräsen umfasst die drei Prozessschritte des Messerschleifens, des Messerkopf-Einrichtens und des Kegelrad-Fräsens. Der Prozess des Kegelrad-Fräsens kann durch

eine Optimierungsschleife ergänzt werden, um die Härteverzüge vorzuhalten. In diesem Fall wird der virtuelle Meister für den Qualitätsregelkreis des Verzahnungsfräsen korrigiert. Die Härteverzugskorrektur kann bei geschliffenen Verzahnungen entfallen, da der Prozess unempfindlich gegenüber der Eingangsqualität ist. Zudem wird das Kegel-

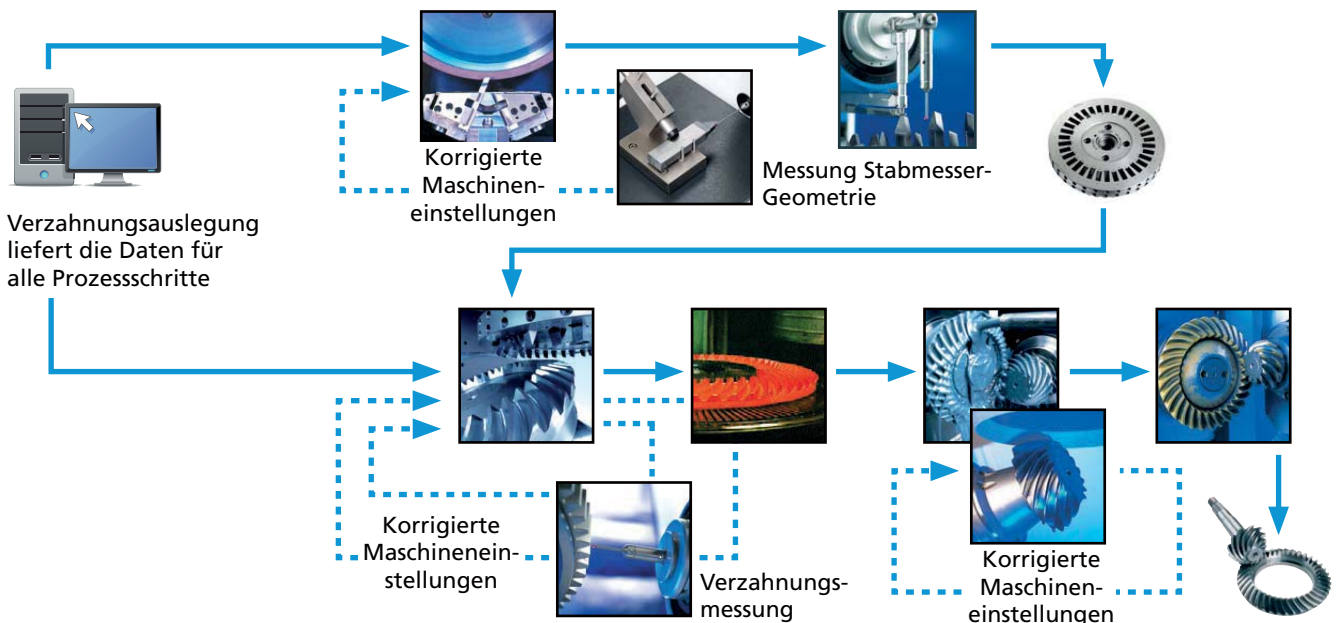


Abb. 4: Prozesskette Kegelrad-Herstellung im Detail

Läppen		Schleifen	
⊖	Nur leichte Verbesserungen von Qualitätsmerkmalen möglich	Konstante Einhaltung von Qualitätsmerkmalen mittels Closed-Loop	⊕
⊖	Härtepressen für Tellerrad-Körper erforderlich	Kein Härtepressen, aber passende Radkörper-Geometrie erforderlich	⊕
⊖	Gute Oberflächenqualität und Teilungsgenauigkeit vor dem Läppen erforderlich	Keine besonderen Anforderungen an Oberflächenqualität und Teilungsgenauigkeit	⊕
⊕	Prozessbedingte Glättung des Zahneingriffs	Sanfter Zahneingriff muss im Design vorgegeben werden	⊖
⊖	Bedienerwissen für Geometriekontrolle und Prozessoptimierung erforderlich (Probearbeiten und Tragbild-Prüfung vor dem Läppen)	Bedienerwissen nur für Überwachung der Geometrie erforderlich	⊕
⊖	Reinigung und Konservierung nach dem Läppen erforderlich	Kein Reinigen und Konservieren erforderlich	⊕
⊖	Rückrufe wegen Undichtigkeiten und Geräuschen über die Lebensdauer	Konstantes Laufverhalten über die gesamte Lebensdauer	⊕
⊕	Minimale Einhärtetiefe	Vergrößerte Einhärtetiefe	⊖
⊖	Fußrücknahmen und Härteverzüge limitieren die Last-Tragfähigkeit	Höchste Last-Tragfähigkeit	⊕
⊕	Tellerrad und Ritzel werden in einem Prozess bearbeitet	Individuelle Bearbeitung von Tellerrad und Ritzel	⊖
⊖	Radsatz muss nach dem Läppen gepaart und mit individuellem Einbaumaß montiert werden	Kein Paaren erforderlich, konstantes Einbaumaß	⊕

rad-Schleifen über einen eigenen Qualitätsregelkreis optimiert. Sollten schwankende Härteverzüge in der Produktion die Qualität des geschliffenen Bauteils beeinflussen, wird dieser Einfluss im Closed-Loop des Kegelrad-Schleifens eliminiert. Diese Möglichkeit besteht beim Läppen nicht.

Fazit

Die Wahl des Hartfein-Bearbeitungsverfahrens ist auch im Zeitalter von Industrie 4.0 in erster Linie eine Frage der Anwendung. Aufgrund der Zahnform und der erreichbaren Qualität bietet sich das Kegelrad-Schleifen für sehr hoch belastete Getriebe und höchste Geräuschanforderungen an. Bei stark streuenden Härteverzügen und ge-

forderter Flexibilität der Produktion ist das Kegelrad-Schleifen ebenfalls dem Kegelrad-Läppen vorzuziehen, um unverhältnismäßig große Aufwendungen für Härteverzugs-kompensationen zu vermeiden.

Ein weiterer entscheidender Vorteil: Fertigung im selbstoptimierenden Closed-Loop ermöglicht den Aufbau dezentraler Produktionsnetzwerke, um standortübergreifend eine gleichbleibend hohe Fertigungsqualität sicher zu stellen. Die Vernetzung dezentraler Produktionsstätten in einem globalen Produktionsnetzwerk wird zukünftig der Erfolgsfaktor sein, um ortsunabhängig wirtschaftlich höchste Qualitäten bereitstellen zu können. ◆



Dr.-Ing. Markus Brumm

Technologiezentrum
Werkzeugmaschinen/Gesamtleiter,
KLINGELNBERG GmbH



Dipl.-Ing. Frank Seibicke

Leitung CA-Tools,
KLINGELNBERG GmbH