

WIRTSCHAFTLICHE FERTIGUNG VON KEGELRÄDERN IN KLEINSTEN LOSEN



Die Fertigung von Kegelrädern in unterschiedlichen Größen selbst in kleinsten Losen unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit schließt sich keinesfalls aus. Um das zu realisieren, bedarf es neben optimalen Prozessketten insbesondere spezielle Werkzeug-Systeme und Verzahnverfahren. Die in der Antriebstechnik bei Klingelnberg eingesetzten Technologien sind konzipiert, um eine große geometrische Bandbreite in höchster Qualität auch bei Einzelsätzen kosteneffektiv produzieren zu können.

Ob Schiffsantrieb, Zementmühle oder Schienenfahrzeug – im Bereich der Antriebstechnik gehören ein- bis selten zweistellige Losgrößen zum Alltag. Um dabei in der Produktion die hohen Qualitätsanforderungen möglichst kostengünstig zu erreichen, sind besondere Strategien gefragt, die über effektive, standardisierte Prozesse optimale Produkte garantieren. Im Vergleich zur Großserien-Fertigung im Automobil- und Nutzfahrzeug-Bereich kann beispielsweise nicht auf Einstellteile für das Einrichten von Prozessen zurückgegriffen werden. Vielmehr muss jedes Werkstück ein Gutteil werden.

Klingelberg hat die Technologien von Verfahren aus der Serienproduktion, wie die Trockenbearbeitung mit beschichteten Hartmetall-Werkzeugen, durchgängig für alle Bauteil-Größen auf das Universalgeschäft übertragen. Bei der Entwicklung neuer Werkzeug-Systeme und Verzahnverfahren stand und steht stets im Vordergrund, etablierte Standards aus dem Seriengeschäft auch für den Universalbereich zu adaptieren und Synergien zu nutzen.

Die Basis für wirtschaftliches Verzahnungsbilden ist ein moderner Maschinenpark. Es werden durchgängig CNC-gesteuerte Neutraldaten-Maschinen eingesetzt, welche die mechanische Maschinengeneration komplett ersetzt haben. Bestückt werden diese Maschinen jeweils mit universellen Werkzeug-Systemen, die nach einem Baukasten-Prinzip konzipiert sind. Die Schneidengeometrie der nach Nennmodul gestuften Universalmesser ist flexibel einsetzbar. Im Gegensatz zu individuell auslegungsbezogenen Schneidprofilen im Seriengeschäft lassen sich hiermit verschiedenste Geometrien innerhalb eines definierten Spektrums fertigen.

Die Produktion erfolgt durchgängig nach dem Prinzip des Closed-Loop. Dadurch wird sichergestellt, dass das Eigenschaftsprofil des gefertigten Radsatzes innerhalb enger Toleranzen der Originalauslegung ent-

spricht. Das Herzstück bildet hierbei eine zentrale Produktionsdatenbank, über die alle Stationen miteinander verknüpft sind. Für jede Radsatz-Geometrie wird hierin ein Datensatz geführt, der u.a. die genauen Informationen zur Flankenmikrogeometrie enthält.

Vom Schmiederohling zum Kegelrad

Egal, ob wenige Zentimeter oder über zwei Meter groß – die Produktion von Kegelrädern läuft weitestgehend nach ähnlichen Prozessfolgen ab. Das Ausgangsmaterial bildet jeweils ein Schmiederohling. In kleinen Abmessungen erfolgt der Rückgriff auf geschmiedetes Stangenmaterial, bei größeren Werkstückabmessungen kommen individuelle, konturnah geschmiedete Rohlinge zum Einsatz. Eine hauseigene Materialspezifikation sowie eine optimal auf den Standard-Werkstoff abgestimmte Wärmebehandlung bilden wichtige Grundlagen, um beispielsweise den hohen Qualitätsanforderungen der Klassifikationsgesellschaften bezüglich Ausgangsmaterial und Fertigerzeugnis zu entsprechen. Mittels der hauseigenen Berechnungssoftware KIMoS (Klingelberg Integrated Manufacturing of Spiral Bevel Gears) wird auf Basis der Kundenvorgaben die Makrogeometrie und unter Berücksichtigung des Verzahnungsumfeldes auch die Mikrogeometrie der Flanken festgelegt. Diese Daten bilden die Grundlage für alle weiteren Produktionsschritte. Zunächst wird der Radkörper durch mechanische Bearbeitung wie Drehen, Fräsen und Bohren erzeugt und anschließend weichverzahnt.

Kompakt

Trockenprozesse beim Weichverzahn

Effektive Technologien aus der automobilen Serienproduktion waren Vorbild: Trockenverzahnprozesse mit beschichteten Hartmetall-Schneidern garantieren auch in der Universalfertigung extrem günstige Produktionsbedingungen über alle Bauteil-Größen.

Hohe Qualität, kurze Lieferzeiten und Planungssicherheit beim Kunden kennzeichnen die Produktion auch bei kleinen Losgrößen.

Daran schließt sich die Wärmebehandlung durch Einsatzhärten an. Hierbei wird das beanspruchungsgerechte Eigenschaftsprofil der Verzahnung eingestellt: eine harte, verschleißfeste Oberfläche in Kombination mit einem zähen Kernmaterial. Da die Wärmebehandlung eine Kernkompetenz der Kegelrad-Fertigung darstellt, betreibt Klingelberg eine hauseigene Härtereie, die optimal auf das Produktspektrum abgestimmt ist. Im weiteren Verlauf werden zunächst die für das Verzahnungen relevanten Referenzflächen an Ritzel und Tellerrad bearbeitet. Daran schließt sich die Hartfein-Bearbeitung der Verzahnung sowie deren Messung an. Schließlich folgt die mechanische Fertigbearbeitung der Ritzelschäfte und Radkörper. Im Rahmen der Endkontrolle erfolgt die finale Qualitätsprüfung als letzter Schritt der Prozesskette vor der Auslieferung.

Während vor rund zehn Jahren das bewährte Zyκλο-Palloid®-Verfahren mit dem Schäl-Wälzfräsen als Hartfein-Bearbeitung das gesamte Größenspektrum abdeckte, stellt sich die heutige Produktmatrix differenzierter dar. In Abhängigkeit von der Bauteil-Größe kommen beim Verzahnungen jeweils optimal abgestimmte Maschinen, Verfahren und Werkzeug-Systeme zum Einsatz. Das Schäl-Wälzfräsen im Zyκλο-Palloid®-Verfahren findet mit modifiziertem Werkzeug-System heute weiterhin Anwendung bei großen Kegelrädern. Dagegen werden kleine

und mittlere Kegelradsätze inzwischen ausschließlich schleiftechnisch endbearbeitet. Welche Verfahren heute in Abhängigkeit vom Tellerrad-Durchmesser eingesetzt werden, zeigt Abbildung 1 „Fertigungsmatrix“.

Arcoflex für kleine Kegelräder

Mit der jüngsten Innovation – dem Arcoflex-Verfahren – setzt Klingelberg auch bei der Produktion kleiner Kegelräder bis 500 mm Tellerrad-Durchmesser konsequent auf die Technologie der Trockenbearbeitung. Dieses Universalverfahren zum Fräsen und anschließenden Schleifen von Kegelrädern bildet einen bestmöglichen Kompromiss aus Produktivität und Flexibilität. Ein besonderes Merkmal des Systems Arcoflex ist, dass es als Universalverfahren keiner speziellen Maschinenausführung bedarf. Vielmehr kann es problemlos auf den in der Serienfertigung etablierten Maschinen der C- und G-Baureihe, wie z. B. C 50 und G 60, ohne mechanische Umrüstung umgesetzt werden.

Im Fokus bei der Entwicklung von Arcoflex stand die Adaption des Konzepts des Stabmesser-Kopfes aus der Automobilindustrie. Der entscheidende Unterschied gegenüber dem Seriengeschäft liegt in der Standardisierung der Schneidenprofile für die eingesetzten Hartmetall-Stabmesser. Durch deren flexible Einsatzmöglichkeiten für verschie-

Fertigungsmatrix

	Klein	Mittel	Groß
Teilkreis-Durchmesser (mm)	< 500	500–1.000	> 1.000
Normalmodul (mm)	2–9	7–18,5	12–50
Werkzeug-Radien (mm)	47,625/55,5625 63,5/76,2/95,25 114,3/133,35 152,4/177,8/203,2	170 210 260	350 450 550 650
Verzahnverfahren	Arcoflex	Wiener-2-Spur	Zyκλο-Palloid®
Hartfein-Bearbeitung	Schleifen	Schleifen	Schäl-Wälzfräsen

Abb. 1: Verzahnverfahren und Hartfein-Bearbeitung in Abhängigkeit von der Bauteil-Geometrie

TILT- UND MESSERPROFILE

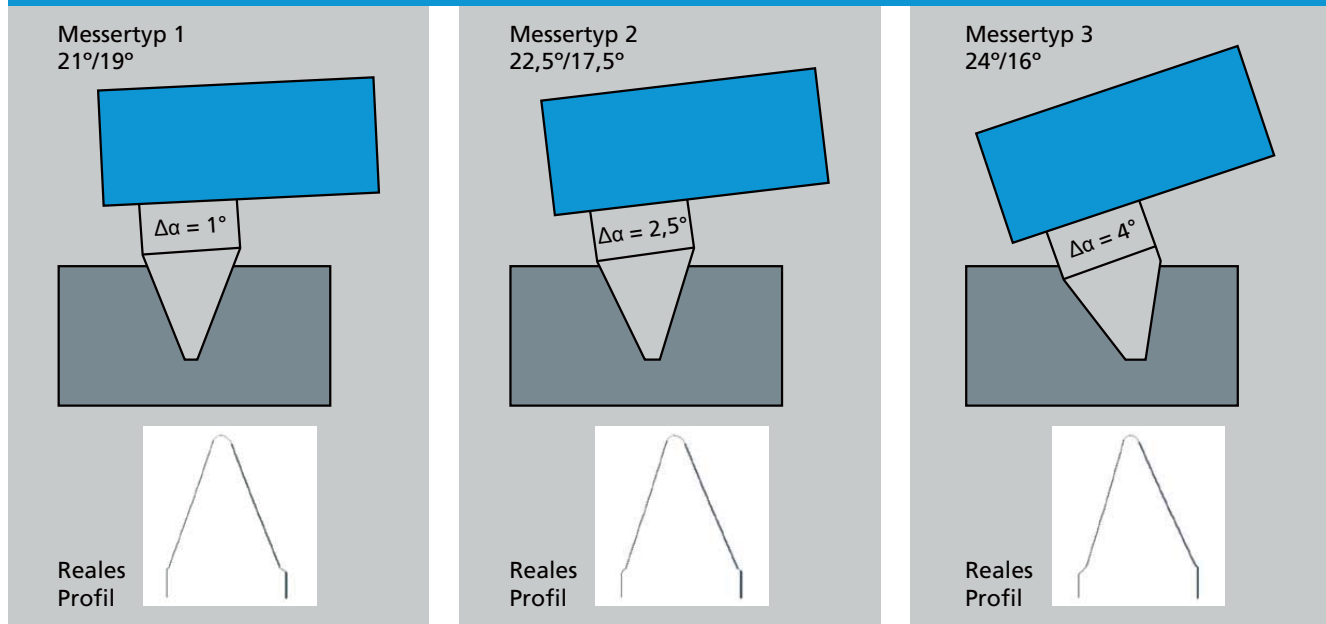


Abb. 2: Erzeugung der Längsballigkeit durch Messerkopf-Neigung und die realen Werkzeug-Profile

denste Geometrien innerhalb eines definierten Spektrums wird die Werkzeug-Lagerhaltung auf einen geringen Umfang begrenzt. In Kombination mit UAC-Messerköpfen (Universal ARCON® Cutter), die mehrere Flugkreis-Radien auf einem Grundkörper vereinen, wird der erforderliche Werkzeug-Umfang weiter reduziert. Schließlich begrenzt die Festlegung auf Messerköpfe mit einheitlicher Steigungsrichtung den Werkzeug-Bedarf auf ein Minimum. Darüber hinaus wird durch den Verzicht auf Unterlegplatten eine einfache und schnelle Werkzeug-Einstellung gewährleistet. Das macht die Produktion extrem flexibel und gleichzeitig effektiv.

Zahnbreiten, Durchmesser oder Spiralwinkel sind für jede Verzahnungsgeometrie verschieden – die Stabmesser mit standardisiertem Profil sind jedoch innerhalb eines bestimmten Normalmodul-Bereichs für nahezu beliebige Geometrien flexibel einsetzbar. Die Standardisierung der Stabmesser für das Weichverzahnungen schlägt sich analog in den Profilen der Schleifscheiben für die Hartfein-Bearbeitung nieder. Unabhängig

davon sind bedarfsgerechte Modifikationen des Scheibenprofils weiterhin möglich.

Der Arcoflex-Prozess entspricht dem des Semi-Completing. Im Unterschied zum Zyκλο-Palloid®-Verfahren erfolgt die Erzeugung der Längsballigkeit durch Neigung des Messerkopfes anstelle von Variation der Werkzeug-Radien. Um die infolge der Messerkopf-Neigung entstehende Beeinflussung der Eingriffswinkel zu kompensieren, stehen je Messer-Nennmodul drei Flankenwinkel-Varianten zur Verfügung. Das Prinzip und die realen Werkzeug-Profile erläutert Abbildung 2 „Tilt- und Messerprofile“.

Neben der Flexibilität erreicht Klingelberg mit dem Arcoflex-System eine neue Dimension der Produktivität: Entsprechend der Prozessfolge beim Semi-Completing folgt auf das Tauchen der Zahnlücken das Wälzen der konvexen Flanken. Mit automatisch geänderten Maschinensettings folgt direkt im Anschluss das Wälzen der konkaven Flanken ohne zwischenzeitlichen Werkzeug-Wechsel. Somit ist das Verfahren ideal für den Einsatz auf Einspindelmaschi-

Kompakt

Extrem flexibel: Werkzeuge nach Baukasten-Prinzip

Basis der Kegelrad-Fertigung bei Klingelberg sind jeweils spezifisch für kleine, mittlere und große Bauteile entwickelte universelle Verzahnverfahren in Kombination mit Werkzeug-Systemen nach dem Prinzip eines Baukastens. Das macht die Produktion extrem flexibel.

FLANKENVERGLEICHE

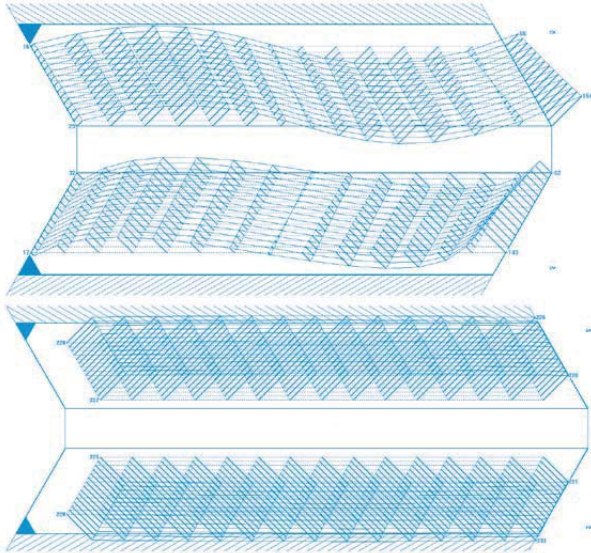


Abb. 3 a: Ungleichmäßige Aufmaßverteilung: kontinuierliches Weichverzahnen vs. Schleifen im einzelteilenden Verfahren

Abb. 3 b: Äquidistante Aufmaßverteilung: Weichverzahnen und Schleifen jeweils im einzelteilenden Verfahren

nen der C- und G-Baureihe geeignet. Im Idealfall können Ritzel und Tellerrad mit identischem Werkzeug verzahnt werden. Es erfolgt dann lediglich eine Umkehr der Schnitttrichtung.

Weichverzahnen und Schleifbearbeitung erfolgen beim Arcoflex-Prozess im einzelteilenden Verfahren. Dadurch ergibt sich jeweils ein kreisbogenförmiger Zahn längsverlauf. Somit ist eine äquidistante Aufmaßverteilung für die spätere Hartfein-Bearbeitung durch das Schleifen garantiert. Hieraus folgt eine höhere Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum Vorverzahnen im kontinuierlichen Zylo-Palloid®-Verfahren mit nachfolgender Schleifbearbeitung. Die Egalisierung der unterschiedlichen Zahn längsverläufe entfällt beim Arcoflex-Verfahren, wodurch der Schleifprozess beschleunigt und gleichzeitig eine homogene Verteilung der verbleibenden Einsatzhärte-Tiefe über der Flanke sichergestellt wird (siehe hierzu auch Abbildung 3 a/b „Flankenvergleiche“).

Bei der Umstellung vorhandener Zylo-Palloid®-Auslegungen in Arcoflex kommt ein weiterer Vorteil zum Tragen: Die konstante Zahnhöhe bleibt erhalten. Somit hat der Wechsel des Verzahnverfahrens keinerlei

Auswirkungen auf die Geometrie der Radkörper. Die Drehkörper-Kontur und somit die Einbauverhältnisse im Getriebegehäuse sind absolut identisch.

Wiener-2-Spur für mittelgroße Kegelräder

Der Grundstein der Technologieoptimierung wurde im Bereich mittelgroßer Kegelräder mit einem Tellerrad-Durchmesser größer als 500 mm bereits vor etwa zehn Jahren gelegt. Mit der Inbetriebnahme der G 100 hat Klingelberg neue Maßstäbe gesetzt und den Anwendungsbereich der Hartfein-Bearbeitung durch Schleifen auf knapp über 1.000 mm erweitert. Diese Technologie repräsentiert im mittleren Größenbereich heute den Stand der Technik und hat in der Antriebstechnik im Hause Klingelberg das Hartschäl-Wälzfräsen bereits seit längerem vollständig substituiert. In Verbindung mit der Weichbearbeitung im Trockenprozess nach dem einzelteilenden Verfahren wird – analog bzw. als Vorlage für das Arcoflex-Verfahren im kleinen Bereich – eine äquidistante Aufmaßverteilung über der Flanke für die spätere Hartfein-Bearbeitung sichergestellt. Anwendung findet hier das Wiener-2-Spur-Verfahren. Die Prozessfolge besteht aus dem Tauchvorgang gefolgt vom Wälzprozess für die konvexen Flanken. Nach einem Werkzeug-Wechsel schließt sich mit geänderten Maschinensettings das Wälzen der konkaven Flanken an. Auch bei diesem Verfahren sind die Messer im Baukasten-System angelegt und nach Nennmodul gestuft. Das Closed-Loop-Konzept findet hier in spezieller Form (vgl. Infobox „Verzahnen mit höchster Effizienz und Qualität“ auf S. 35) bereits beim Weichverzahnen Anwendung und erfolgt ohne Abspannen des Werkstücks durchgängig auf der Maschine.

Zylo-Palloid® für große Kegelräder

Beim Verzahnen von Groß-Kegelrädern bis zu 3.000 mm Tellerrad-Durchmesser kommt weiterhin das bewährte Zylo-Palloid®-Verfahren mit einteiligem Messerkopf zum Ein-

satz. Im direkten Vergleich zur vorherigen Maschinen- und Werkzeug-Generation hat Klingelberg auch in diesem Bereich umfangreiche Maßnahmen zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit umgesetzt. Mit Inbetriebnahme der C 300 steht erstmals auch für Groß-Kegelräder eine CNC-gesteuerte Neutraldaten-Maschine zur Verfügung. Diese verfügt über eine Doppelspindel, um das Kegelritzel in einer Aufspannung beidflankig bearbeiten zu können. Minimale Werkstück-Wechselzeiten garantieren Rüst- und Abrüststation, sodass diese Vorgänge hauptzeitparallel erfolgen können. Mit dem SPIRON®-U-System wurde auch in diesem Bereich eigens ein neues Werkzeug-Konzept entwickelt. Das Weichverzahnen im Trockenprozess wird durch den Einsatz von Wende-Schneidplatten aus beschichtetem Hartmetall ermöglicht. Diese verfügen jeweils über vier nutzbare Schneidkanten. Somit entfällt neben dem Einsatz des Kühl-Schmiermittels darüber hinaus auch eine kostenintensive Werkzeug-Aufbereitung. Das universelle Werkzeug-System ist auch in diesem Anwendungsbereich nach dem Baukasten-Prinzip konzipiert. Die Messerkopf-Grundkörper sind flexibel für beide Spiralrichtungen zum Weich- wie auch zum Hartverzahnen einsetzbar. Der Verzicht auf Vor- und Mittelschneider bei den wiederum nach Nennmodul gestuften Universalmessern ermöglicht eine höhere Gangzahl und macht das SPIRON®-U-Werkzeug-Konzept im direkten Vergleich mit bisherigen Systemen besonders produktiv.

Aufgrund der mit der Bauteil-Größe zunehmenden Kontaktlänge zwischen Werkzeug und Werkstück scheidet eine schleiftechnische Hartfein-Bearbeitung aus, da eine ausreichende Versorgung mit Kühl-Schmiermittel nicht gewährleistet werden kann. Für die Hartfein-Bearbeitung setzt Klingelberg daher weiter auf das bewährte Konzept des Schäl-Wälzfräsens mit CBN-Schneidleisten, das ebenfalls an die höhere Gangzahl der Messerkopf-Grundkörper angepasst wurde. Dieses ermöglicht in Verbindung mit den Freiheitsgraden der Neutraldaten-Maschine C 300 die effektive Erzeugung bedarfsgerechter Flankenform-Modifikationen.

Fazit

Ob Einzelsatz mit einer Tellerrad-Größe von mehr als zwei Metern oder ein Dutzend Bauteile von wenigen Zentimetern Durchmesser – Klingelberg hat seine Verzahnverfahren und Werkzeug-Systeme auf die wirtschaftliche Produktion kleinster Losgrößen optimiert. Dieser mehrstufige Prozess, in dem für unterschiedliche Bauteil-Größen neue Lösungsansätze entwickelt und realisiert wurden, fand schließlich mit der Implementierung des neuen Arcoflex-Verfahrens seinen vorläufigen Abschluss.

Flexible Universal-Werkzeuge nach dem Baukasten-Prinzip bilden die Grundlage bei der Produktion kleinster Losgrößen. Sie garantieren ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Werkzeug-Bedarf, Einstellaufwand und Bearbeitungszeit. Der durchgängige Einsatz der Trockenbearbeitung zum Weichverzahnen in Verbindung mit jeweils optimal abgestimmter Hartfein-Bearbeitung ist der Garant für eine wirtschaftliche Produktion.

Höchste Produktqualität sichert die durchgängige Umsetzung des Closed-Loop-Prinzips über alle Baugrößen. Durch die Kombination aus leistungsfähiger Berechnungssoftware mit einem prozess- und anwendungsoptimierten Maschinenpark erfüllt Klingelberg alle Anforderungen an die Produktion von Kegelrädern jeglicher Größen und Geometrien. ◆



VERZAHNEN MIT HÖCHSTER EFFIZIENZ UND QUALITÄT

- Closed-Loop umfasst auch das Weichverzahnen
- Spezielle Strategie ohne Verwendung von Einstellteilen
- Fräsen des ersten Werkstücks eines Loses mit Zugabe in der Tiefenposition
- Berechnung expliziter Sollwerten für den zuvor erzeugten Zustand
- Messung mittels KOMPASS-Mess-taster auf der Maschine
- Abgleich zwischen Soll- und Ist-Messdaten mittels KOMET auf der Verzahnmaschine
- Erzeugung und Einlesen der Korrekturdaten
- Abschließende Bearbeitung auf Sollgeometrie

Dipl.-Ing. Rudolf Houben

Leiter Berechnung und Konstruktion
Kegelradverzahnung,
KLINGELBERG GmbH