



Aufbruch in eine neue Dimension

Inhalt:

- Von der Schmelze zum Drehkörper
... Seite 2
- Effizientes Verzahnen von Großkegelrädern
... Seite 3
- Closed Loop
... Seite 4
- Wärmebehandlung und Hartverzahnen
... Seite 5
- Dokumentierte Qualität – fertig für den Einsatz
... Seite 5
- Der Kreis schließt sich
... Seite 6

Der optimale Einsatz von Großkegelrädern ist nur möglich, wenn alle Schritte von Anfang an ineinandergreifen: beginnend mit der Auslegung über die Fertigung bis hin zur Montage im Getriebegehäuse. Die neue Großkegelradfertigung von Klingelberg bildet das Herzstück der Prozesskette bei der Herstellung von Großkegelrädern. Sie ist die Basis für die Fertigung qualitativ hochwertiger Kegelradsätze, kurze Lieferzeiten und Planungssicherheit bei den Kunden.



Gefragt ist die hohe Leistungskapazität von Großkegelrädern vor allem in der marinen Antriebstechnik, in Zement- und Kohlemühlen sowie bei Kegelbrechern. Grundlage für eine anwendungsoptimierte Auslegung eines Kegelradsatzes auf Basis der Kundenvorgaben ist die Anwendung der Klingelberg-Berechnungssoftware KIMoS (Klingelberg Integrated Manufacturing of Spiral Bevel Gears) in Verbindung mit der Kompetenz der Berechnungsexperten im Hause Klingelberg. Tabelle 1 zeigt Eingangsgrößen und Ergebnisse der Grundauslegung im Überblick. Unter Berücksichtigung der geforderten Leistungsübertragung und Übersetzung in Verbindung mit den aus dem Anwendungsfall resultierenden Randbedingungen – wie Lastüberhöhungen im Betrieb, Wirkungsgrad und Geräuschverhalten – erfolgt die Festlegung der Makrogeometrie. Im Rahmen des Festigkeitsnachweises werden normgerecht die Sicherheitsfaktoren gegen Fuß- und Flankenschäden bestimmt und mit den geforderten Werten abgeglichen. Die Berücksichtigung des Verzahnungsumfeldes bereits in der Designphase gewinnt zunehmend an Bedeutung. Infolge Toleranzen bei Fertigung und Montage, lastbedingter Abdrängungen sowie thermischer Einflüsse kommt es zu Veränderungen der räumlichen Relativlage von Kegelritzel und Tellerrad im Betrieb. Damit einher gehen Änderungen der Tragbildlage und des Verdrehflankenspiels.

Auf der Basis einer statischen und dynamischen Gesamtbetrachtung können die sich einstellenden Verlagerungskennwerte bestimmt werden. Im Rahmen der Optimierung der Mikrogeometrie werden gezielte Flankenformmodifikationen vorgenommen, um diese Verlagerungen zu kompensieren und ein optimales Lasttragbild zu erzielen. Die mittels KIMoS berechnete Flankengeometrie bildet die Grundlage für die Zahnkontaktanalyse zwecks Darstellung der Tragbildlage im lastlosen Zustand sowie unter Last (Bild 1) unter Einbeziehung des Umfeldes. Auf diese Weise kann schon in einem sehr frühen Stadium des Produktentstehungsprozesses ein hohes Maß an Planungssicherheit garantiert werden.

Von der Schmelze zum Drehkörper

Am Anfang der eigentlichen Fertigung steht die Rohlingsherstellung. Als Werkstoff für Großkegelräder wird nahezu ausschließlich der Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 verwendet. Dieser zeichnet sich durch eine hohe erzielbare Einsatzhärte in Verbindung mit einer hohen Kernhärte aus. In Ergänzung zur DIN EN 10084 stellt eine hauseigene Bestell- und Liefervorschrift erweiterte Anforderungen hinsichtlich chemischer Analyse, Korn-

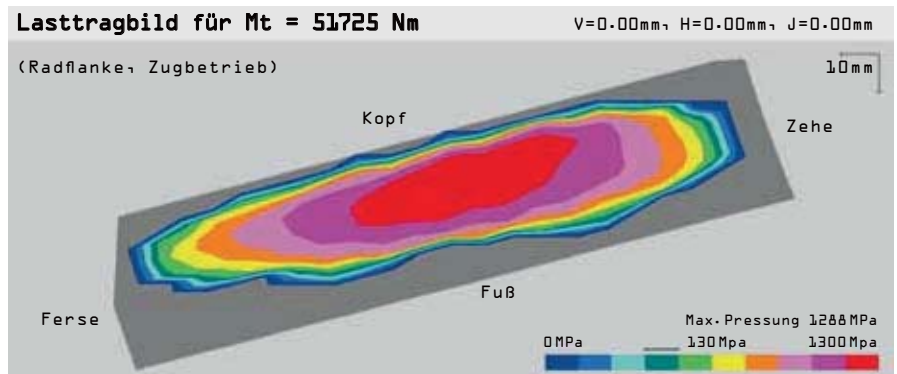
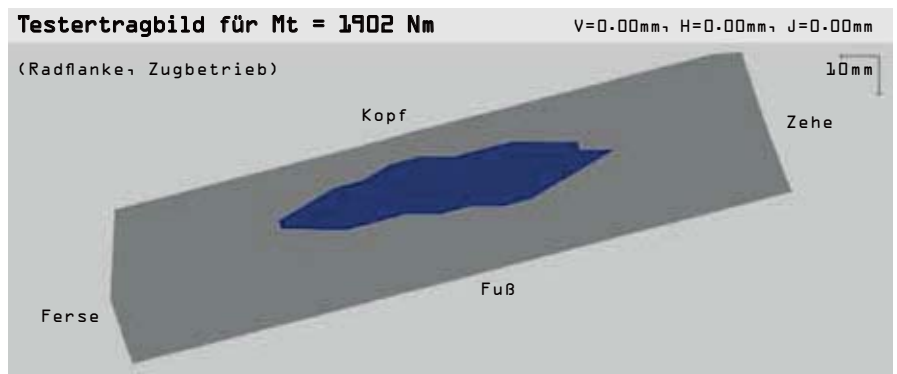
Eingangsgrößen für die Grundauslegung sind:

- Drehmoment und Drehzahl
- Anwendungsfall
- Geforderte Sicherheiten für Zahnfuß und Zahnflanke

Ergebnisse der Grundauslegung sind:

- Makrogeometrie (Zähnezahlen, Abmessungen, ...)
- Tragfähigkeitskennwerte nach DIN/ISO u.a. Normen

Tabelle 1: Grundauslegung



Zug (Optimierung der konkaven Ritzel-Flanke)

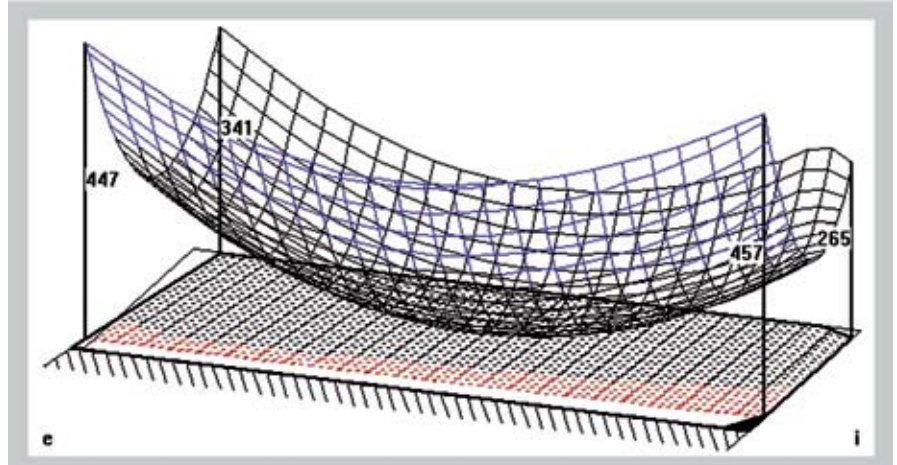


Bild 1: Zahnkontaktanalyse in KIMoS: Tragbilder lastlos, unter Last und Ease-Off (von oben nach unten)

größe, Reinheitsgrad und Härtebarkeit und bedingt daher eine Schmelzselektion. Bei der Warmumformung zum Walz- oder Schmiederohling ist ein Mindestumformgrad von 4 in Verbindung mit einem optimalen Faserverlauf zu gewährleisten. Im Anschluss werden die Rohlinge weichgeglüht, vergütet und allseitig vorgedreht. Die Dokumentation der Materialeigenschaften und der geforderten Prüfergebnisse, wie z. B. Ultraschall- und magnetische Rissprüfung, erfolgt in Form eines Abnahmeprüfzeugnisses nach EN 10204. Die Herstellung von Großkegelrädern erfolgt überwiegend unter Begleitung und Kontrolle durch die Klassifikationsgesellschaften. Eine wesentliche Anforderung ist die eindeutige Identifikation des Ausgangsmaterials über die gesamte Prozessfolge. Insbesondere bei der mechanischen Bearbeitung im Rahmen der Drehlingserstellung besteht die Notwendigkeit, dass Probennummer und Klassenstempel auf dem Werkstück erhalten bleiben. Dies kann durch das Einbringen einer geeigneten Stempelrinne bereits am Walz- oder Schmiederohling gewährleistet werden. Andernfalls muss das Werkstück während der Bearbeitung durch einen Abnahmebeamten umgestempelt werden.

Effizientes Verzahn von Großkegelrädern

Das Weichverzahn erfolgt auf der neu entwickelten Kegelradverzahnmaschine des Typs C 300 (Bild 2). Die CNC-gesteuerte Neutraldatenmaschine operiert nach dem bewährten, kontinuierlich arbeitenden Zylo-Palloid-Verfahren mit einteiligem Messerkopf. Zu diesem Zweck verfügt die Maschine über eine Doppelspindel, um das Kegelritzel in einer Aufspannung bearbeiten zu können. Die Vorrüststation besteht aus einem Drehtisch inklusive Messarm. Hiermit wird der Rundlauffehler des auf die Planscheibe aufgebrachten Werkstücks erfasst. Über eine Anzeige erhält der Bediener die benötigten Informationen zur Korrektur der Werkstückausrichtung. Das fertig bearbeitete Werkstück wird auf der Abrüststation ab-

gelegt, um anschließend das hauptzeitparallel vorgerüstete Werkstück der Bearbeitung zuzuführen. Somit sind minimale Werkstückwechselzeiten garantiert.



Bild 3: *Werkzeugsystem SPIRON-U*

Mit dem SPIRON-U-System (Bild 3) wurde für die C 300 ein vollständig neues Werkzeugkonzept entwickelt. Hiermit konnte der in der Serienfertigung bereits etablierte und bewährte Trockenverzahnprozess mit beschichteten Hartmetallwerkzeugen erfolgreich auf das Weichverzahn von Großkegelrädern übertragen werden. Neben dem Verzicht auf den Einsatz von Kühlschmiermitteln entfällt durch die Verwendung von Wendeschneidplatten mit vier nutzbaren Schneidkanten zudem die kostenintensive Werkzeugaufbereitung. Das universelle Werkzeugsystem ist als Baukasten konzipiert. Es besteht aus Messerkopfgrundkörpern mit Nennflugkreisradien von 350, 450, 550 und 650 Millimeter. Diese sind nicht spiralrichtungsgebunden und sowohl für das Weich- als auch für das Hartverzahn einsetzbar. Die Universalmesser sind nach Nennmodul (14 bis 46 Millimeter) gestuft und überdecken jeweils einen bestimmten Normalmodulbereich. Ein Nennmodul umfasst vier Messer: Innen- und Außenmesser, jeweils für die Links- und für die Rechtsspirale. Basis für die hohe Produktivität des SPIRON-U-Werkzeugsystems ist die durchgängige Realisierung der Gangzahl $z_0 = 7$ – bisherige Systeme arbeiten mit drei bzw. fünf Messergruppen – durch den Verzicht auf Vor- und Mittelschneider. Für die Hartfeinbearbeitung wurde das bewährte Konzept des Schälwälzfräsens mit CBN-Schneiden an die höhere Gangzahl der Messerkopfgrundkörper angepasst.



Bild 2: *Auf der Verzahnmaschine C 300 erfolgt das Weich- und Hartverzahn von Großkegelrädern*

Verzahnmaschine C 300

- Neutraldatenmaschine
- Zylo-Palloid-Verfahren mit einteiligem Messerkopf => Doppelspindel
- Trockenbearbeitung
- Vor- und Abrüststation

Closed Loop

Mit der neuen CNC-gesteuerten Verzahnmaschinengeneration hat das Closed-Loop-Konzept auch in der Großkegelradfertigung Einzug gehalten. Dadurch wird sichergestellt, dass das Eigenschaftsprofil des gefertigten Radsatzes dem Entwurf innerhalb enger Toleranzen entspricht. Eine zentrale Produktionsdatenbank bildet das Herzstück des Closed-Loop-Konzepts. Hierin werden die mittels KIMoS entwickelten Datensätze für die Produktion bereitgestellt. Alle Stationen, beginnend mit dem Werkzeugeinstellgerät CS 300 über die Verzahnmaschine C 300 bis hin zum Präzisionsmesszentrum P 300, sind über diese zentrale Datenbank miteinander vernetzt und können jeweils aufeinander aufbauend arbeiten (Bild 4).

Die im KIMoS-Datensatz definierten Werkzeugeinstelldaten werden vom Werkzeugeinstellgerät CS 300 aus der zentralen Datenbank eingelesen. Der Messerkopfgrundkörper wird zunächst manuell bestückt. Dieser verfügt über radial angeordnete Nuten, in denen die Messer stufenlos einstellbar sind. Neben der Messung von Rund- und Planlauf übernimmt das Gerät im automatischen Zyklus auch die radiale Positionierung der Messer und befestigt diese mittels der integrierten Schraubereinheit rückseitig mit dem geforderten Drehmoment. Die erreichbare Rundlauftoleranz beträgt ± 5 Mikrometer und wird abschließend in einem Messprotokoll dokumentiert. Alle für das Weich- und Hartverzahnen benötigten Maschineneinstelldaten sind im KIMoS-Datensatz definiert.



- Werkzeugeinstellgerät CS 300**
- Messung von Rund- und Planlauf
 - Radiale Positionierung der Messer
 - Integrierte Schraubereinheit

Das jeweils relevante Datensatzkapitel wird hierzu von der Kegelradverzahnmaschine C 300 aus der zentralen Produktionsdatenbank eingelesen. Im Vergleich zur mechanischen Verzahnmaschinengeneration ergeben sich daraus folgende Vorteile:

- Durch den Wegfall langwieriger manueller Einstellungen einzelner Maschinenachsen anhand in Papierform vorgegebener Einstelldaten ergeben sich minimale Rüstzeiten. Gleichzeitig wird der Maschinenbediener bei den Rüsttätigkeiten deutlich entlastet.

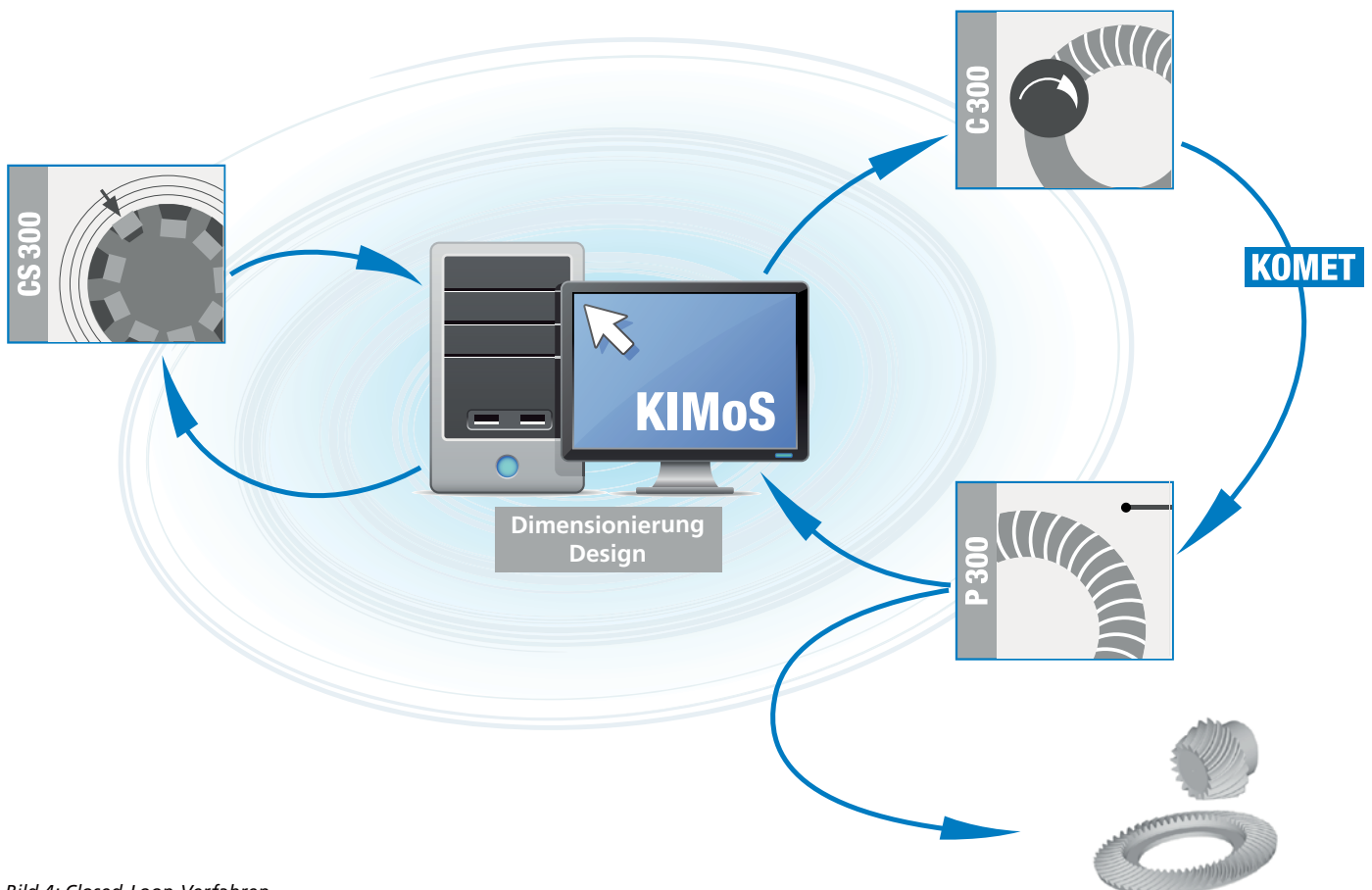


Bild 4: Closed-Loop-Verfahren

- Die einzeln angetriebenen Maschinenachsen bieten erweiterte Freiheitsgrade und damit eine höhere Flexibilität zur Erzielung geeigneter Flankenformmodifikationen.

Auch das Präzisionsmesszentrum P 300 ist in das Closed-Loop-Konzept eingebunden. Aus der Produktionsdatenbank werden die Solldaten für die Teilungs- und Topografiemessung eingelesen. Die aus der Messung resultierenden Istdaten des Werkstücks werden im zugehörigen Datensatz abgelegt. Bei Bedarf können diese mittels KOMET-Software einem Soll-/Ist-Abgleich unterzogen werden. Nach Auswahl geeigneter Parameter lassen sich die daraus bestimmten Korrekturdaten über die Datenbank an die Verzahnmaschine übertragen. In der Praxis wird für jeden Kundenauftrag ein individueller Datensatz geführt, um den Bearbeitungs- und Messablauf produktionsgerecht und verwechslungsfrei abwickeln zu können. Gleichzeitig ist damit eine lückenlose Dokumentation aller relevanten Prozessschritte gewährleistet.



Präzisionsmesszentrum P 300

- Messung von Verzahnungsteilung und Topographie
- Rechnergestützte Vier-Achsen Bahnsteuerung
- Hilfseinrichtungen für Ausrichtevorgang

Wärmebehandlung und Hartverzahn

Damit der Werkstoff den an Getriebekomponenten gestellten Anforderungen und Beanspruchungen gerecht wird, ist zwingend eine Wärmebehandlung durch Einsatzhärten erforderlich. Nur so kann das gradierte Eigenschaftsprofil hergestellt werden: eine harte und verschleißfeste Oberfläche sowie ein zäher Kern. Die Wärmebehandlung stellt eine Kernkompetenz bei der Kegelradfertigung dar. Parallel zum Bau der neuen Produktionshalle für Großkegelräder wurden daher auch die Kapazitäten der hauseigenen Härtereierweitert und an das herstellbare Produktspektrum angepasst. Mit der Wärmebehandlung gehen zwangsläufig Härteverzüge einher, deren Minimierung stets im Vordergrund steht. Zu diesem Zweck wurde die Prozesskette eigens um einen Messvorgang zur Erfassung der an den Bauteilen vorliegenden Verzüge erweitert. Dieser Schritt schließt sich direkt an die mechanische Bearbeitung zum Hartverzahn an, in deren

Rahmen die für das Verzahn relevanten Referenzflächen an Ritzel- und Radkörpern bearbeitet werden. Basierend auf den gewonnenen Messergebnissen erfolgt eine satzweise individuelle Anpassung der für das Schälwälzfräsen erforderlichen Datensätze. Ziel hierbei ist die Erreichung eines minimalen Flankenabtrages zwecks Sicherstellung einer maximalen am Werkstück verbleibenden Einsatzhärte unter Berücksichtigung der bedarfsgerechten Flankenformmodifikationen. Gleichzeitig sind damit kurze Prozesszeiten gewährleistet.

Zunächst werden die Tellerräder hartverzahn und gemessen. Nach erfolgter Anpassung ergibt sich ein analoger Ablauf auch für die Ritzel. Darauf folgen die finale mechanische Bearbeitung der Radkörper bzw. Ritzelschäfte sowie das Fertigschleifen der Lagersitze. Den Abschluss der Prozesskette bildet die Endkontrolle.

Dokumentierte Qualität – fertig für den Einsatz

Die Erfüllung der Kundenvorgaben sowie der Vorschriften seitens der Klassifikationsgesellschaften werden mit Nachweisen im jeweils individuell geforderten Umfang belegt:

- Materialzeugnisse
- Tragbildfotos
- Messprotokolle
- Wärmebehandlungsnachweis (in Bezug auf die erzielte Einsatzhärte tiefe)
- Dokumentation der mechanischen Materialeigenschaften

Jeder Radsatz wird nach dem Hartverzahnen einer abschließenden Tragbildprüfung unterzogen, wobei sich die unter einer geringen Prüflast ermittelten Tragbilder mit den Vorgaben der Zahnkontaktanalyse aus KIMoS decken müssen. Sofern die im Rahmen der Dimensionierung getroffenen Annahmen bezüglich der sich einstellenden Verlagerungswerte im Betrieb zutreffen, müssen auch die beim Kunden zum Teil durchgeführten Tragbildprüfungen unter Last den simulierten Lasttragbildern entsprechen. Dieser praktische Nachweis gestattet es dem Anwender in bestimmten Fällen, einen Kegelradsatz gegebener Geometrie mit einer höheren Leistung betreiben zu können.

Der Kreis schließt sich

Zwischen der ersten Auslegung und dem fertig montierten Radsatz liegen zahlreiche Bearbeitungs-, Berechnungs- und Dokumentationsschritte. Entscheidend auf diesem Weg sind zwei Kriterien:

- Am Ende sind die zentralen qualitativen Anforderungen an einen Kegelsatz erfüllt: dauerhafte Tragfähigkeit, minimale Verluste und geringe Geräusentwicklung.
- Der Fertigungsprozess ist lückenlos dokumentiert und schlank – für möglichst kurze Prozesszeiten.

Klingelberg bietet durch die Kombination von leistungsfähigen Berechnungswerkzeugen in Kombination mit einem prozess- und anwendungsoptimierten Maschinenpark das gesamte Spektrum für die Herstellung von Großkegelrädern aus einer Hand.



Dipl.-Ing. Rudolf Houben
Leiter Berechnung und Konstruktion
Kegelradverzahnung