

DAUERHAFT ZUVERLÄSSIG AUCH BEI GERINGER SCHMIERUNG – KEGELRADSÄTZE FÜR HIGH-SPEED-BEARBEITUNGSPROZESSE



In der spanenden Fertigung ermöglichen neue Schneidstoffe in Kombination mit Hochleistungsbeschichtungen stattliche Drehzahlen von bis zu 20.000 Umdrehungen pro Minute. Solch hohe Drehzahlen stellen besondere Anforderungen an die Kegelradverzahnungen, die bei entsprechenden Werkzeugsystemen zum Einsatz kommen. Der Wälzkontakt der Kegelradverzahnung muss so ausgelegt sein, dass er auch in Anwendungsbereichen mit minimaler Schmier- rung bzw. Kühlung ohne Flankenschäden sicher funktioniert.

Aus dem Highspeed-Bearbeitungsprozess ergeben sich hohe Umfangsgeschwindigkeiten am Außendurchmesser des im Getriebestrang eingebauten Kegelrades und den Wellen – und das bei geringem Drehmoment bzw. geringen Kräften an der Schneidfläche des Werkzeuges. Eine Schmierung der Verzahnung in einem Ölsumpf scheidet allein schon wegen der Planschverluste und der hohen Zentrifugalkräfte, die den Schmierstoff aus dem Wälzkontakt treiben, aus. Daher wird lediglich Ölnebel in das Getriebe eingeblasen. Das Getriebegehäuse kann nur mit einer Labyrinthdichtung abgedichtet werden, durch die der Ölnebel auch wieder austritt. Da das Gemisch das gesamte System versorgen soll, also die Kegelradverzahnung ebenso wie die umliegenden Lager, wird kein spezielles additiviertes Getriebe-, sondern Hydrauliköl verwendet. Aus dieser Konstellation ergibt sich ein geringer Grad der Schmierung, für den die Radsätze speziell ausgelegt sein müssen.

Bei bestimmten Bearbeitungsaufgaben, wie z. B. im Flugzeugbau werden wertvolle Werkstücke mit großen Spanvolumina aus dem Vollen bearbeitet und das Werkzeug muss über lange Zeiträume betriebssicher im Eingriff bleiben.

Alle Aspekte, wie die hohen Geschwindigkeiten, die niedrigen Drehmomente und die spezielle Schmier-situation müssen so in einem sinnvollen Gesamtkonzept berücksichtigt werden, dass auch sämtliche Anforderungen erfüllt werden: lange Betriebszeiten,

generelle Betriebssicherheit, Vermeidung von starker Wärmeentwicklung, die eine thermische Dehnung des Gehäuses und damit eine Verschiebung der Einbauposition des Kegelradsatzes zur Folge hätte.

Kegelrad schlägt Kronenrad

Erste zu treffende Entscheidung: Kegel- oder Kronenrad? Hier geht der Zuschlag ganz klar an das Kegelrad, denn auch, wenn die kinematischen Aspekte bei beiden gleich sind, hat das Kegelrad einige Vorteile: Zum einen können sowohl der Wälzkontakt als auch die notwendige Fertigungsqualität exakt an die Anforderungen und Rahmenbedingungen angepasst werden. Zum anderen trägt diese Art der Verzahnung grundlegend zu einem deutlich ruhigeren Lauf des Gesamtgetriebes bei. Denn bei Kegelrädern kann der Drehfehler, also die nicht ganz exakte Bewegungsübertragung, sicher berechnet und gestaltet werden.

Kompakt

Zuverlässige Schmierung auch bei Highspeed

Hohe Geschwindigkeiten, niedrige Drehmomente und minimale Schmierung müssen in Einklang gebracht werden, um langen Betriebszeiten und starker Hitzeentwicklung standhalten zu können. Klingelnberg hat auf diesem Gebiet neuartige Techniken entwickelt und Lösungen geschaffen.

Bei Maschinen mit diesen hohen Drehzahlen muss die Kegelradverzahnung so ausgelegt sein, dass sie auch bei nicht optimaler Schmierung zuverlässig funktioniert.



Schleifen eines Ritzels aus dem Vollen



Schleifen eines Ritzels

Gestaltung der High-speed-Kegelradsätze

Die nächste Problematik bei hohen Drehzahlen liegt in dem entsprechend großen Energieeintrag in die Zahnflanken, der zu Flankenschäden führt. Für die Auslegung von Highspeed-Kegelradsätzen gibt es drei zentrale Ziele:

1. Maximierung des Wirkungsgrades, damit verbunden
2. Minimierung der Verlustleistung und
3. Vermeidung von Flankenschäden durch Optimierung des Wälzkontaktes (z. B. relatives Gleiten und Wärmeeintrag).

GRUNDLAGENWISSEN UND ERFAHRUNGEN AUS DEM RENNSPORT

Intensive Forschung

Grundlagenversuche zu Zahnflankenschäden

Die praxisgerechte Auslegung und die Beratungsleistung von Klingelberg gründet sich in intensiver Forschungs- und Entwicklungstätigkeit in diesem Bereich. Mitarbeiter führten Grundlagenversuche zu Zahnflankenschäden durch, es fanden Auslegungsstudien bei Kunden statt, es wurden Erfahrungen bei Auslegungen für hochbeanspruchte Rennsport-Radsätze gesammelt.

Optimale Versorgung

Variantenstudium mithilfe der Auslegungsprogramme

Die hohen Drehzahlen und großen Lasten im Rennsport erfordern die optimale Versorgung mit Ölschmierstoff durch zusätzliches Einspritzen des Öls in den Kontaktbereich. Die verwendeten Auslegungsprogramme KIMoS und BECAL sind Industriestandard – beide Programme ermöglichen die realitätsnahe genaue Betrachtung des Kontaktbereichs, so dass auch alternative Auslegungen studiert werden können.

Temperaturanforderung

Getriebeoptimierung für hohe Temperaturanforderungen

Eine weitere Anforderung an das Getriebe betrifft die Temperatur: Das Getriebegehäuse darf an der Außenseite nur eine bestimmte Temperatur erreichen, deswegen muss der Gesamtwirkungsgrad der Verzahnung und des restlichen Getriebes optimiert sein. Die Hochgeschwindigkeitsradsätze von Klingelberg tragen dazu bei, dass die Temperaturanforderungen, die das Getriebegehäuse maximal haben darf, erfüllt werden.

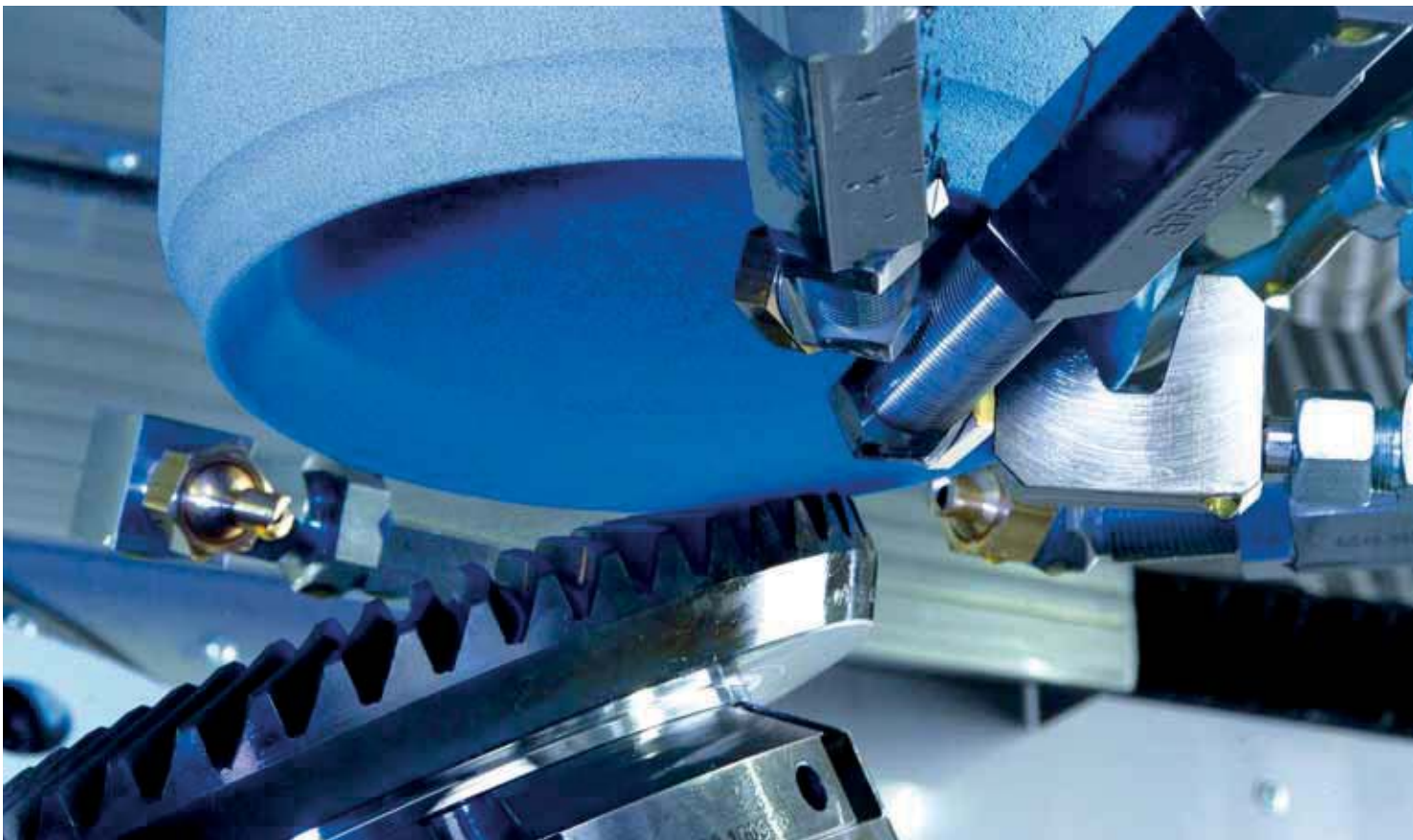
Um die geforderte hohe Betriebsdauer und Betriebssicherheit zu gewährleisten, müssen sowohl die Makro- als auch die Mikrogeometrie der Zahnflanken, die Bearbeitungsverfahren, das verwendete Material und die Wärmebehandlung exakt aufeinander abgestimmt werden.

Die Optimierung des Wirkungsgrades bedeutet zugleich eine Minimierung der Verlustleistung, die einen erheblichen Einfluss auf das Tribosystem hat. Mit der Kombination aus Highspeed bei niedrigen Flankenpressungen und einer minimalen Schmierung im Wälzkontakt betritt Klingelberg Neuland in der Kegelradauslegung.

Die möglichen Gestaltungsfelder haben teilweise gegenläufigen Einfluss auf das Ergebnis. Die erforderliche Zahnfußtragfähigkeit ist durch die geringen Lasten in der Regel gegeben. Somit konzentriert sich

Mit der Kombination aus Highspeed bei „Low-Pressure“ in Verbindung mit minimaler Schmierung im Wälzkontakt betritt Klingelberg Neuland in der Kegelradauslegung.

alles auf das Geschehen auf der Flanke: Hier können in der Auslegung auch unkonventionelle Wege beschritten werden. So können z. B. Freiheitsgrade genutzt werden, die sonst bei Anwendungen im Rennsport wegen der hohen Lasten ausscheiden.



Fertigschleifen eines getauchten Tellerrades

„Reduzierte Luftschallemission und verbesserte Qualität beim Fräsen zeigen, dass die Verzahnung in Wechselwirkung mit dem Antriebsstrang bis hin zur Schneide steht.“

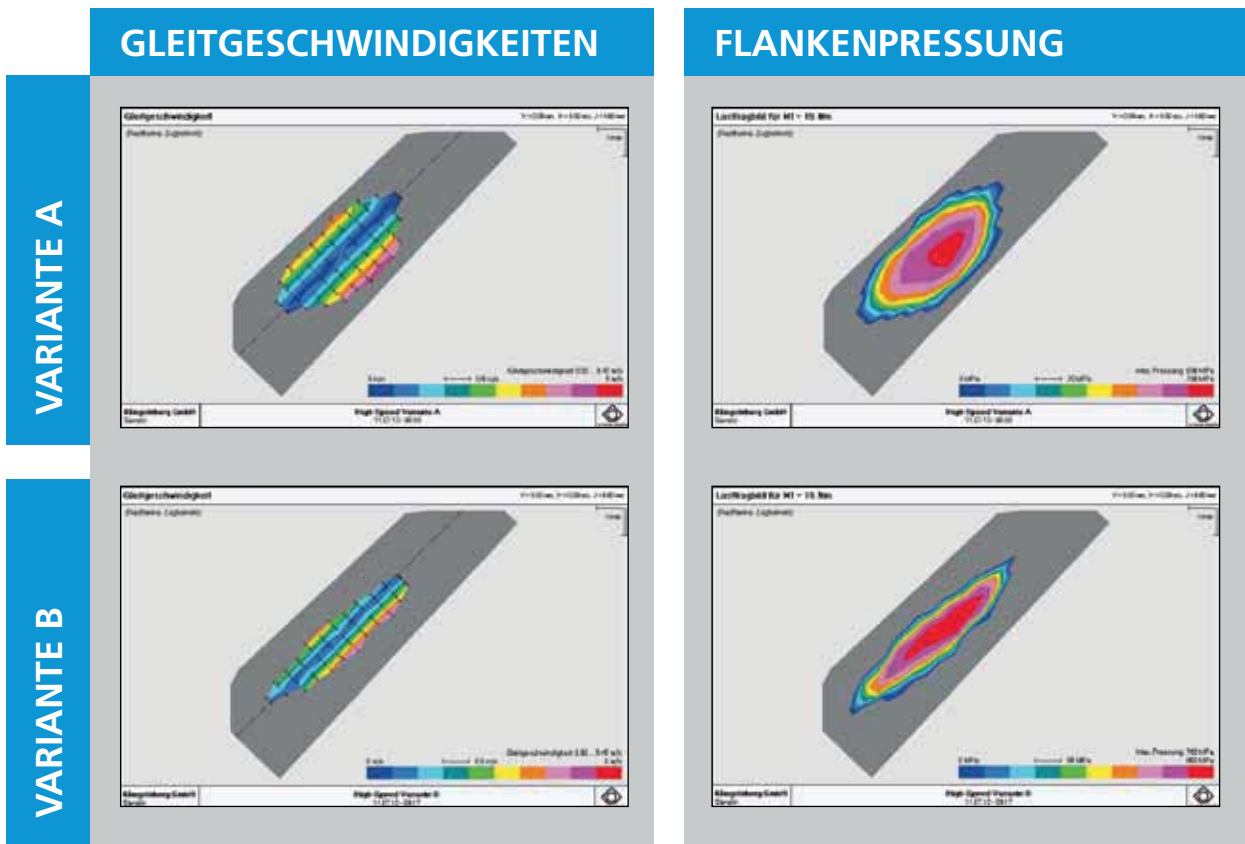
Thomas Serafin, Antriebstechnik/Berechnung und Konstruktion, KLINGELNBERG GmbH

Mit KIMoS (Klingelberg Integrated Manufacturing of Spiral Bevel Gears) und BECAL (Bevel Gear Calculation Program) stehen leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung, die eine vollständige Analyse und Gestaltung der Kinematik im Wälzkontakt ermöglichen. Dadurch können die verzahnungstheoretischen Aspekte im Tribosystem „Kegelradgetriebe“ studiert werden.

Minimierte Verlustleistung

Verlustleistung entsteht u. a. durch hohe Relativgeschwindigkeiten der Flanken im Bereich der Lasttragbilder sowie durch hohe

Zwei EaseOff-Varianten mit variiertem Höhenballigkeit



Beim EaseOff mit kleiner Höhenballigkeit (oben) ist zwar die Flächenpressung verringert, die Gleitgeschwindigkeiten steigen aber überproportional an und damit auch die Verlustleistung.

Da die höhere Flächenpressung bei größerer Höhenballigkeit (unten) für das verwendete Material unkritisch ist, wurde diese Variante gewählt. Allein die Veränderung der Höhenballigkeit reduziert die Verlustleistung aus dem Wälzkontakt um 25 %. Diese Auslegung erweist sich zudem als weniger verlagerungsempfindlich.



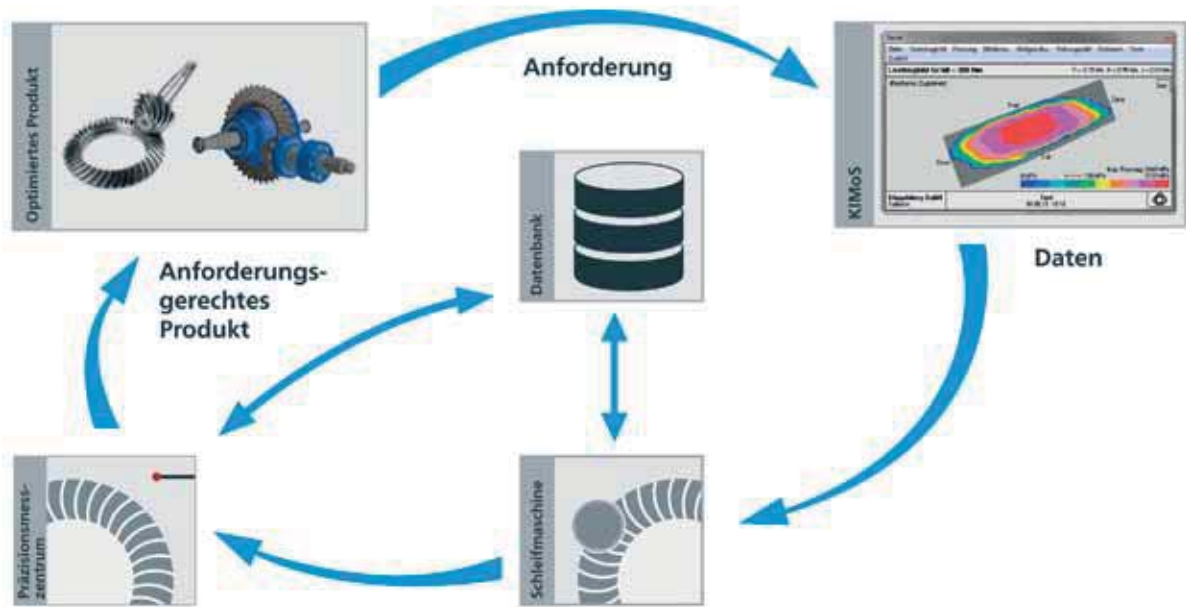
Kegelräder, die in Flugzeugen zum Einsatz kommen, müssen den höchsten Qualitäten bezüglich Teilung und Rundlauf (DIN 1–3) entsprechen und darüber hinaus absolut zuverlässig die Drehbewegung ausführen.

Oberflächenrauigkeiten. Bei der Gestaltung sowohl der Makro- als auch der Mikrogeometrie muss deshalb der Wälzkontakt unter Last im Bereich der kleinsten Gleitgeschwindigkeiten konzentriert werden. Diese Zone liegt beim Kegelradgetriebe ohne Achsversatz in unmittelbarer Nähe zum Teilkegel. Daher wählt man bei gegebener Baugröße des Kegelradsatzes Zähnezahlen bzw. Übersetzung, Spiralwinkel, Profilverschiebung, Profilhöhenfaktoren und Werkzeugdurchmesser so, dass dieser Gestaltungsansatz bereits umgesetzt wird: durch Parameter der Makrogeometrie. Ein Hypoidgetriebe (mit Achsversatz) scheidet von vorneherein aus. Die Geometrie des Werkzeuges muss die Herstellbarkeit der Kegelradverzahnung insbesondere beim Schleifen aus dem Vollen gewährleisten. Die Mikrogeometrie der Zahnflanken (bzw. den EaseOff) legt man anschließend so aus, dass das Tragbild auf dem Teilkegel liegt und eine geringe Ausprägung in Zahnhöhenrichtung aufweist.

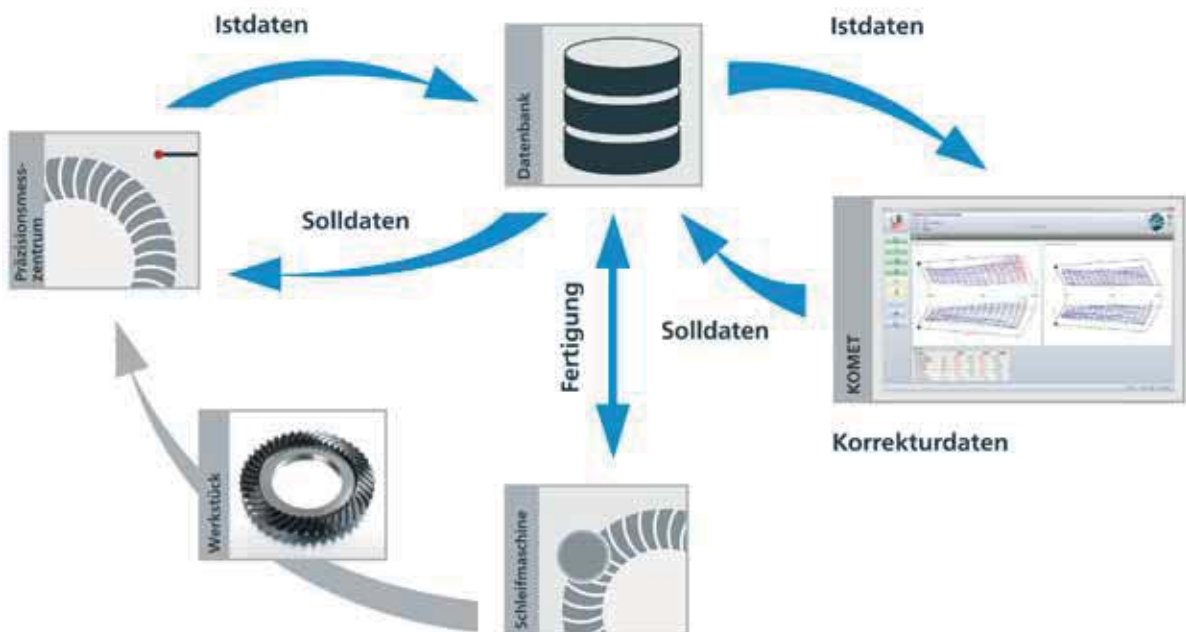
Durch eine Anpassung der Längsballigkeit wird der Drehfehler in der Regel auf ein akzeptables Niveau reduziert. Die Verlagerungsfähigkeit des EaseOffs ist ausreichend, da wegen der kleinen Lasten bei steifem Gehäuse von kleinen Verlagerungen auszugehen ist. Die minimierte Verlustleistung führt zu einem geringen Wärmeeintrag ins Gehäuse und somit zu vernachlässigendem thermischem Wachstum.

Eine gute Laufruhe reduziert die Luftschallemission, die bei so hohen Drehzahlen erheblich ist, und trägt somit dazu bei, dass die Arbeitsatmosphäre für die Maschinenbediener angenehmer wird. Zudem verbessert dies die Qualität der vom Fräser bearbeiteten Flächen. Hier zeigt sich, dass die Verzahnung in Wechselwirkung mit dem gesamten Antriebsstrang vom Motor bis zur Schneide steht.

Closed-Loop-Konzept



KIMoS – zur optimalen Auslegung



KOMET – von der Auslegung zum optimalen Fertigungsergebnis

Präzise Fertigungsverfahren und optimale Prozesssicherheit

Zum Erreichen der notwendigen Topografie- und Oberflächenqualitäten verwendet Klingelberg Fertigungsverfahren, die minimale Abweichungen von der berechneten Kontur der Zahnflanken sicherstellen. Die Kegelradverzahnung wird im weichen Zustand mit Aufmaß aus dem Vollen und erst nach der Wärmebehandlung fertig geschliffen. Dieses Verfahren ist bei kleinen Losgrößen eine äußerst wirtschaftliche Alternative zum Fräsen.

Durch die Einbindung ins Closed-Loop-Konzept mit dem Korrekturprogramm KOMET erreicht Klingelberg zuverlässig Spitzenqualität: Die Verzahnung und das Einbaumaß werden auf „Null“ gefertigt, was die Montage des Kegelradsatzes deutlich vereinfacht. Ein sorgfältiges Ausmessen von Gehäuse, Lagern etc. führt im Allgemeinen zu einer korrekten Tragbildlage.

Da die Oberflächenqualität maßgeblichen Einfluss auf die Blitztemperatur hat, durchlaufen die Zahnflanken in der Fertigung zusätzlich noch einen Superfinishing-Prozess. Für diesen Arbeitsabschnitt hat Klingelberg einen Spezialisten gefunden, der diese Technologie so perfekt beherrscht, dass auch bei kleinmoduligen Verzahnungen die gesamte Flankenfläche bis hin zum Zahnfuß gleitgeschliffen wird.

Um die Notlauffähigkeit auch für den Fall zu gewährleisten, dass der Schmierfilm durch eine unzureichende Ölzufuhr nicht voll ausgebildet ist, muss das verwendete Material hoch warmfest und härtbar sein. Dazu werden die Radsätze aus einem Stahl gefertigt, der sonst in der Luftfahrtindustrie eingesetzt wird und der sowohl klassisch mit Kohlenstoff einsatzgehärtet als auch plasmanitriert werden kann. Durch die Kombination dieser beiden Härteverfahren entstehen extrem harte Oberflächen für bestmöglichen Verschleißschutz.

„Berechnung und Tragbilder der Auslegung sind die Grundlage für gute Radsätze.“

Thomas Serafin, Antriebstechnik/Berechnung und Konstruktion,
KLINGELBERG GmbH

Beratung bis zum stabilen Prozess

Für die optimale Anpassung der Radsätze auf individuelle Anforderungen legt Klingelberg Highspeed-Radsätze speziell auf Basis der Kundenvorgaben zu Geschwindigkeiten, Lasten, Relativlagen, etc. aus. Während der Entwicklungs- und Konstruktionsphase bringt Klingelberg sein langjähriges Know-how ein und unterstützt die Kunden von der Konstruktion bis zur Montage: Nach der Planungs- und Auslegungsphase werden die gefertigten Radsätze montiert und, wenn gewünscht, gemeinsam vor Ort in der Einbausituation kontrolliert. So kann der Maschinenhersteller ganz sicher sein, dass die mit dem Auslegungswerkzeug KIMoS entwickelten Tragbilder perfekt umgesetzt sind. ◆

SCHNELLESEINFO

- Ruhigerer Lauf des Gesamtgetriebes durch kinematische Anpassung
- Minimierter Verlustleistung durch Makro- und Mikrogeometrie
- Wegen der hohen Drehzahlen kann das Getriebe nur mit Labyrinthdichtungen abgedichtet werden und somit kann der Wälzkontakt nur mit einer minimalen Schmierung versorgt werden.
- Zuverlässiges Betriebsverhalten wird erreicht durch Topografie- und Oberflächenqualität und Einbindung ins Closed-Loop-Konzept.
- Optimale Anpassung auf individuelle Anforderungen



Thomas Serafin

Antriebstechnik/Berechnung
und Konstruktion,
KLINGELBERG GmbH