



# Feinschleifen auf KLINGELNBERG Kegelrad-Schleifmaschinen

## Inhalt:

- Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Verzahnungen ... Seite 3
- Erhöhte Tragfähigkeit durch feinere Oberflächen ... Seite 3
- Hochfeine Oberflächen von Stirnradgetrieben... Seite 3
- Sonderfall Kegelradgetriebe ... Seite 5
- Feinschleifen von Kegelradgetrieben – eine Herausforderung ... Seite 5
- Fazit: Feinschleifen auf Kegelrad-Schleifmaschinen ermöglicht gesteigerte Leistungsfähigkeit von Kegelradsätzen ... Seite 6

Eine Möglichkeit, die steigenden Leistungsanforderungen an Getriebe umzusetzen, ist die Optimierung der Oberflächengüte der Verzahnung. Neben einer Steigerung der Flanken-tragfähigkeit und des übertragbaren Drehmoments ist so auch eine Verbesserung des Wirkungsgrads möglich. Auf Oerlikon Kegelrad-Schleifmaschinen von Klingelberg lässt sich die Feinschleifbearbeitung in der Kegelradproduktion auch im industriellen Serienprozess effizient realisieren.



Hohe Effizienz und Leistungsdichte gehören zu den grundlegenden Anforderungen an ein Getriebe. Insbesondere bei hochdynamischen Anwendungen in Fahrzeuggetrieben sind die zulässigen Dimensionen, Massen und Trägheitsmomente der beweglichen Teile streng limitiert. Die Ansprüche an die Übertragung und Wandlung von Drehzahlen und Momenten steigen – und das nicht nur bei Extrem-Anwendungen wie zum Beispiel im Rennsport. Neue Maßgaben an Getriebe werden dabei nur selten durch eine komplette Neukonstruktion umgesetzt. Vielmehr wird häufig auf bestehende und bewährte Komponenten zurückgegriffen, die an die neuen Anforderungen angepasst werden.

Um die Beanspruchbarkeit eines Radsatzes zu erhöhen, kommen Parameter wie Material, Wärmebehandlung, Eigenspannungszustand und Oberflächengüte in Betracht. Speziell der letzte Aspekt, die Oberflächengüte, steht bei Klingelberg im Fokus. Im Bereich von Luftfahrtkomponenten gehören Anforderungen an die Oberfläche geschliffener Kegelradverzahnungen von  $R_a < 0,3 \mu\text{m}$ ,  $R_z < 1,5 \mu\text{m}$  oder feiner zum Standard. Die Erfahrung und Kompetenz, die das Unternehmen im Bereich Luftfahrtanwendungen gesammelt hat, bilden die Grundlage für die Umsetzung des Feinschleifens von Kegelrädern auf Klingelberg Kegelrad-Schleifmaschinen – und damit für eine im industriellen Serenumfeld anwendbare Technologie.

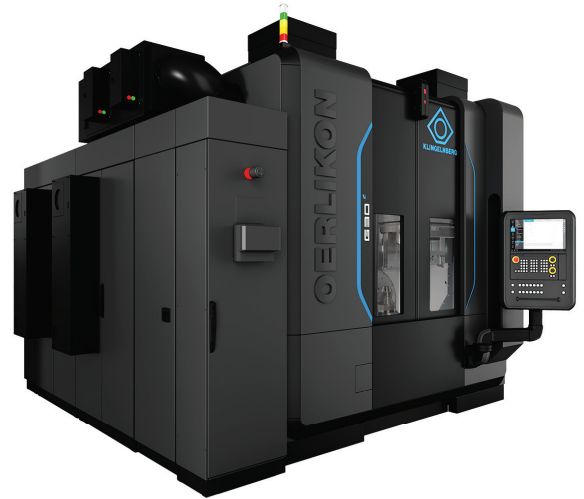


Abbildung 1: Oerlikon Kegelrad-Schleifmaschine G 30

Auf einer Kegelrad-Schleifmaschine Oerlikon G 30 (siehe Abbildung 1) durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass mit keramisch gebundenen Schleifscheiben beim Schleifen von PKW-typischen Kegelritzeln Oberflächenkennwerte von etwa  $R_a = 0,11 \mu\text{m}$  bzw.  $R_z = 0,75 \mu\text{m}$  erreichbar sind. Zum Vergleich: Typische Anforderungen an die Oberfläche der Zahnflanken geschliffener PKW-Hypoidgetriebe liegen heute im Bereich von  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$  bis  $1,6 \mu\text{m}$  oder  $R_z = 4 \mu\text{m}$  bis  $10 \mu\text{m}$ . Die durchgeführten Versuche zeigen also, dass beim Schleifen von Kegelrädern in Serienanwendungen auf Maschinen aus dem Hause Klingelberg noch ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Oberflächengüte vorhanden ist. Die Flankentragfähigkeit der Verzahnung kann entsprechend der Normberechnung durch die verbesserte Oberflächengüte gegenüber dem Serienstandard um mindestens 25 % bis 40 % gesteigert werden (siehe Abbildung 2).

**Aus der Praxis: steigende Leistungsanforderungen an Verzahnungen**

Verschiedene Szenarien können dazu führen, dass ein Kegelradgetriebe angepasst werden muss:

- (1) Ein bestehendes Achsgetriebe soll für einen neuen Verbrennungsmotor mit größerem Antriebsdrehmoment weiter verwendet werden  
⇒ Anforderung: steigende Leistungsdichte
- (2) Zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs soll die Viskosität des Getriebeöls verringert werden  
⇒ Anforderung: gleiche Lebensdauer bei reduzierter Schmierfilmdicke
- (3) Das erhöhte Anfahrmoment bei Einsatz des Elektromotors im Hybrid-Antriebsstrang führt aufgrund des ungünstigen Schmierzustands bei Tauchschmierung zu erhöhtem Verschleiß  
⇒ Anforderung: verbesserte Fresstragfähigkeit

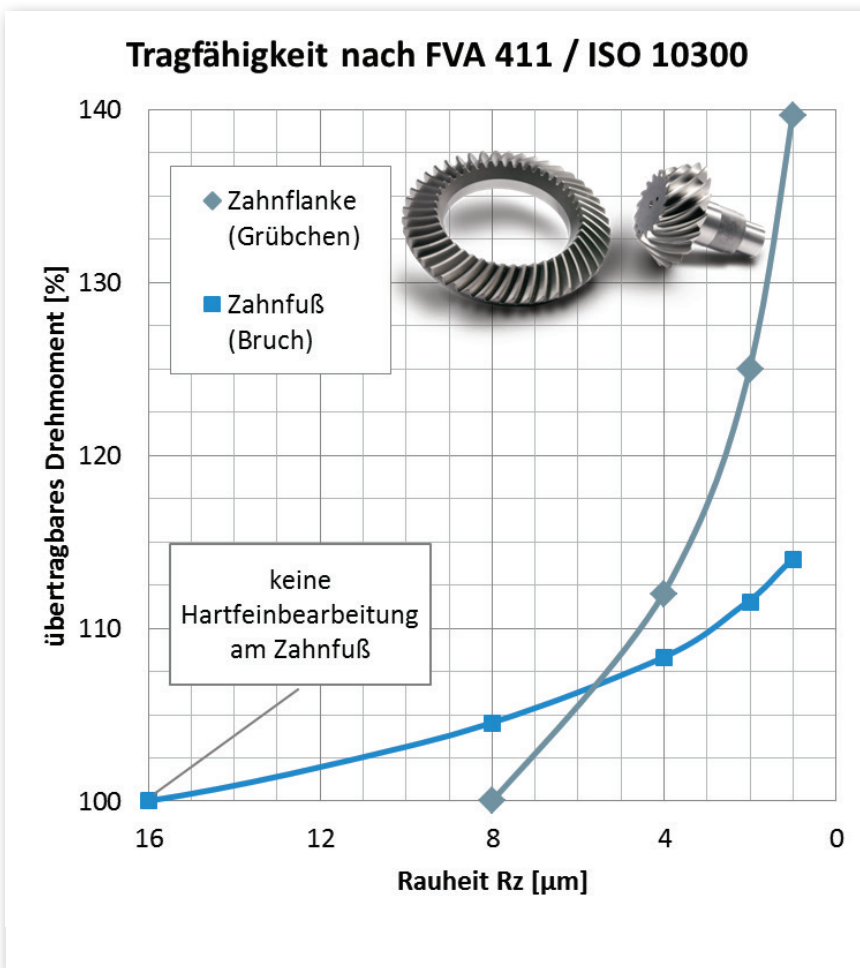


Abbildung 2: Einfluss der Oberflächengüte auf die Normtragfähigkeit eines Automotive-Hypoidradsatzes

Wie lässt sich diesen Anforderungen begegnen?

**Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Verzahnungen**

Bei der Lebensdauerbetrachtung von Verzahnungen steht immer der Vergleich der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit im Fokus. Die Beanspruchung ergibt sich aus den äußeren Lastzuständen, der Verzahnungsmakrogeometrie und dem tribologischen System des Zahnkontakts, der auch durch die Oberflächenbeschaffenheit der Zahn-

Zahnfußes und gegebenenfalls auch der Zahnflanken ist das Einbringen von Druckeigenspannungen in die Randzone der hochbeanspruchten Bereiche mittels Verfestigungsstrahlen. Wird die Strahlbehandlung vor der Hartfeinbearbeitung der Verzahnung durchgeführt, wird ihr positiver Effekt teilweise während der Schleifbearbeitung zunichte gemacht, da das Schleifaufmaß mit etwa 0,10 bis 0,12 mm in derselben Größenordnung liegt wie die Tiefenwirkung des Verfestigungsstrahlens. Wird die Strahlbehandlung erst nach dem Schleifen der Verzahnung durchgeführt, so wird die beim Schleifen erzeugte Beschaffenheit der Oberfläche verändert. Auch die Formhaltigkeit der Kanten insbesondere am Zahnkopf kann durch Strahlwürfe negativ beeinträchtigt werden.

**Erhöhte Tragfähigkeit durch feinere Oberflächen**

Allgemein kann auch durch eine Verbesserung der Oberflächengüte die Beanspruchbarkeit mechanischer Bauteile verbessert werden. Dies gilt sowohl für



Quelle: WZL

Abbildung 3: Beanspruchung von Verzahnungen

flanken beeinflusst wird. Die Beanspruchbarkeit der Verzahnung ihrerseits wird durch das Material, seinen Wärmebehandlungs- und Eigenspannungszustand sowie die Makro- und Mikrogeometrie definiert.

Die hochbelasteten Bereiche einer Verzahnung sind die Zahnflanke und der Zahnfuß (siehe Abbildung 3). Die Zahnflanke ist einer komplexen tribologischen Beanspruchung unterworfen, die zu einer Schädigung durch Graufleckigkeit, Grübchenbildung, Fressen oder Abrasivverschleiß führen kann. Während Graufleckigkeit und Grübchen durch Zerrüttung des Materials an oder unter der Oberfläche entstehen, treten Fressen und Abrasivverschleiß aufgrund des Festkörperkontakts zwischen den beiden Zahnflanken und gegebenenfalls Verunreinigungen im Schmierstoff auf. Der Zahnfuß hingegen wird primär auf Biegung beansprucht. Die kritische Schadensart ist hier der Bruch. Dieser ist unbedingt zu vermeiden: Während eine Verzahnung mit einer Schädigung der Flanke Notlaufeigenschaften aufweist, führt ein Zahnbruch zum spontanen Versagen des Getriebes und häufig zu Folgeschäden.

In den drei beispielhaft genannten Szenarien wird jeweils die Beanspruchung der Verzahnung gegenüber dem Status quo erhöht. Übersteigt diese die Beanspruchbarkeit, wird die geforderte Lebensdauer nicht erreicht. Sind die Möglichkeiten der Anpassung makrogeometrischer Stellgrößen wie Verzahnungsgeometrie, Krümmungsradien und Flankentopografie zur Reduzierung der Beanspruchung und Erhöhung der Beanspruchbarkeit ausgereizt, bleibt nur eine Erhöhung der Beanspruchbarkeit durch Material- oder Oberflächeneffekte.

Ein gängiges Verfahren zur Erhöhung der Tragfähigkeit des

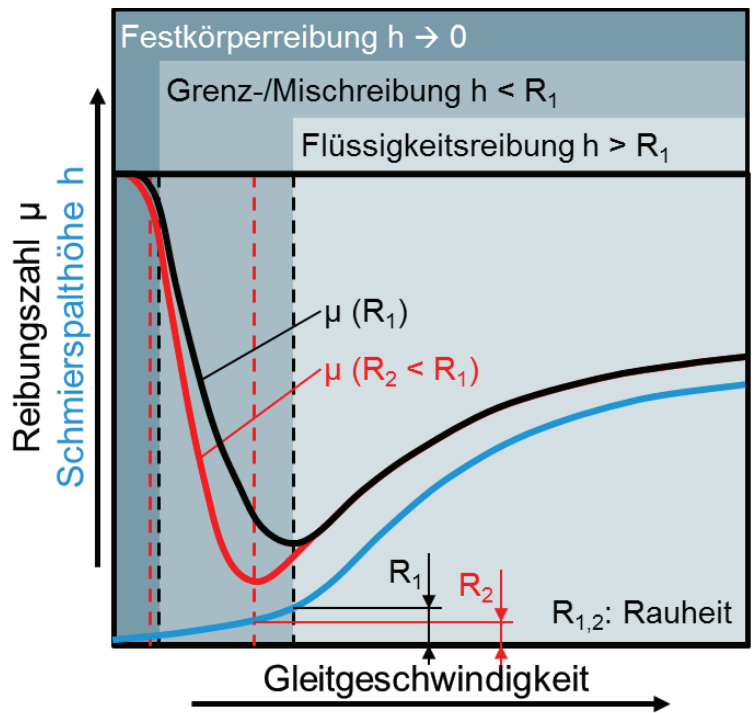


Abbildung 4: Einfluss der Oberflächengüte auf die tribologischen Kontaktbedingungen

mechanische Beanspruchung, wie beispielsweise eine Biege-Schwellbelastung, als auch für Zerrüttung und Abrasion im Tribokontakt.

Im tribologischen Kontakt zweier Körper mit Zwischenmedium Öl baut sich bei steigender Gleitgeschwindigkeit ein anwachsender Schmierpalt auf (siehe Abbildung 4). Ausgehend von Festkörperreibung bei einer Schmierpalthöhe von annähernd  $h = 0$  mm und sehr geringer Gleitge-

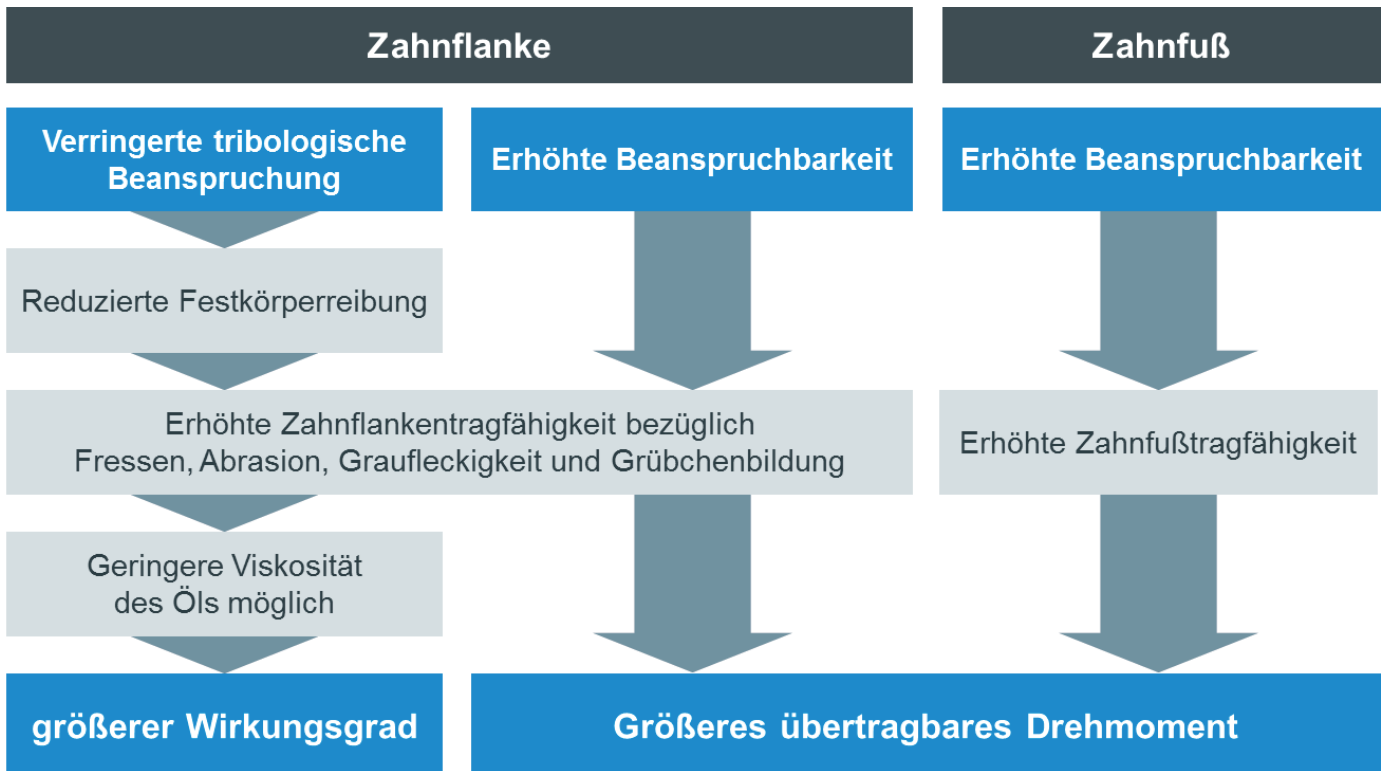


Abbildung 5: Vorteile hoher Oberflächengüten von Verzahnungen

schwindigkeit findet eine Mischung aus Festkörper- und Flüssigkeitsreibung statt, solange der Schmierpalt die Höhe der Rauheitsspitzen nicht übersteigt. Dieser Bereich wird als Mischreibung bezeichnet. Im Bereich der Festkörper- und Mischreibung tritt Verschleiß auf. Reibung und Verschleißangriff nehmen ab, bis mit steigender Gleitgeschwindigkeit der Zustand der Flüssigkeitsreibung erreicht ist. Hier findet kein Festkörperkontakt mehr statt. Bei weiter steigender Gleitgeschwindigkeit nimmt jedoch die Reibung aufgrund der hydrodynamischen Verhältnisse im Schmierpalt wieder zu. Eine reduzierte Oberflächenrauheit der Körper führt dazu, dass Flüssigkeitsreibung bereits bei geringerer Gleitgeschwindigkeit erreicht wird. Somit lassen sich Festkörperkontakt und damit die Reibung und der Verschleiß reduzieren.

Bezogen auf Verzahnungen bedeutet eine höhere Oberflächengüte der Zahnflanke eine Verringerung der tribologischen Belastung aufgrund reduzierter Reibung (siehe Abbildung 5). Hinzu kommt eine erhöhte Beanspruchbarkeit aufgrund der reduzierten Kerbwirkung. Außerdem wird eine erhöhte Graufleckentragfähigkeit erwartet. Alles zusammen führt zu einer erhöhten Tragfähigkeit der Zahnflanke. Auch ein Zahnfuß mit gesteigerter Oberflächengüte weist aufgrund der reduzierten Kerbwirkung eine höhere Beanspruchbarkeit auf. Damit steigt auch die Zahnfußfestigkeit. Das gewonnene Potenzial kann für ein größeres übertragbares Drehmoment genutzt werden. Ist eine Steigerung der Flankentragfähigkeit nicht erforderlich, kann diese durch Einsatz eines dünnflüssigeren Schmieröls auch in einen größeren Wirkungsgrad umgewandelt werden.

### Hochfeine Oberflächen von Stirnradgetrieben

Für Stirnradgetriebe wurden bereits Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächengüte auf die Zahnflankentragfähigkeit durchgeführt. Geschliffene Oberflächen wurden durch Gleitschleifen von  $R_a = 0,30 \mu\text{m}$  auf  $R_a = 0,11 \mu\text{m}$  bzw.  $R_a = 0,07 \mu\text{m}$  verbessert. So konnte das dauerhaft übertragbare Drehmoment um 20 % bzw. 40 % gesteigert werden.[1] Mit einer Variante, die verfestigungsgestrahlt und anschließend gleitgeschliffenen wurde ( $R_a = 0,07 \mu\text{m}$ ), ließ sich sogar eine Steigerung des Drehmoments um 70 % erreichen.[2] Untersuchungen an Großverzahnungen haben zudem gezeigt, dass Graufleckigkeit unterhalb einer Rauheit von  $R_a = 0,3 \mu\text{m}$  vollständig vermieden wird.[3]

Durch Gleitschleifen von Stirnradverzahnungen können Rauheitswerte von weniger als  $R_a = 0,06 \mu\text{m}$  erreicht werden.[4] Bei diesem Verfahren werden typischerweise deutlich unter  $10 \mu\text{m}$  Material entfernt. Daher ist die Formhaltigkeit der Verzahnung annähernd sichergestellt. Da das Verfahren vergleichsweise langwierig ist und einen zusätzlichen Produktionsschritt darstellt, der in einer Serienfertigung kaum darstellbar ist, existieren Bestrebungen, eine vergleichbare Oberflächengüte durch Verfahren mit definierter Werkzeuggeometrie und auf einer Verzahnungsschleifmaschine herzustellen.

Mit herkömmlichen Verzahnungsschleifprozessen werden Rauheitswerte von etwa  $R_a = 0,3 \mu\text{m}$  erreicht. Durch Feinschleifprozesse sind Oberflächen bis zu etwa  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$  realisierbar. Um feinere Oberflächen zu erreichen, können zusätzliche Schleifscheiben mit elastischem Bindungssystem zusätzlich auf der Werkzeugspindel der Schleifmaschine aufgebaut werden. Im Anschluss an das konventionelle Verzahnungsschleifen erfolgt dann ein Polierschleifen mit

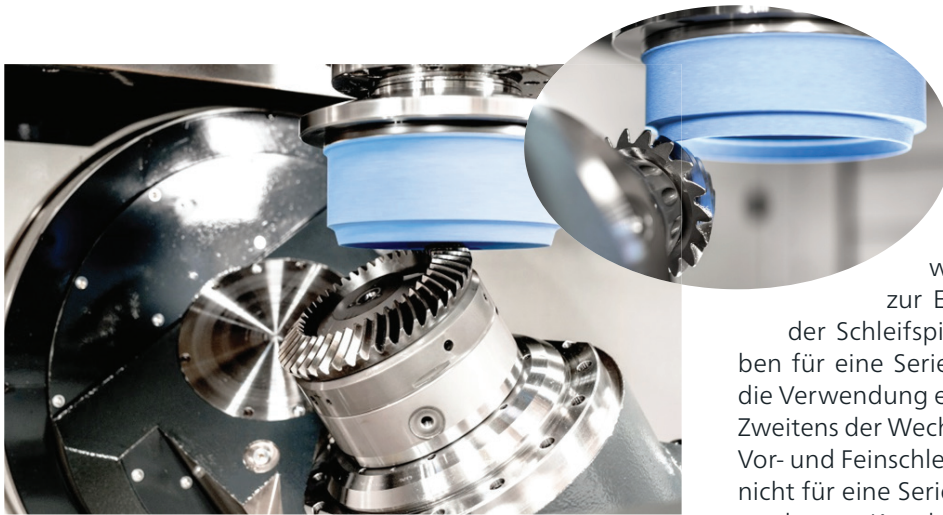


Abbildung 6: Schleifen von Kegelrädern

nur sehr geringem Abschleiff. Rauheitswerte von etwa  $Ra = 0,1 \mu\text{m}$  sind hier möglich. Innerhalb eines Forschungsvorhabens konnten durch Polierschleifen sogar Werte von bis zu  $Ra = 0,05 \mu\text{m}$  ( $Rz = 0,25 \mu\text{m}$ ) erreicht werden.[5, 6]

### Sonderfall Kegelradgetriebe

Charakteristisch für Stirnradgetriebe ist, dass am Wälzkreis immer reines Abrollen ohne Gleiten stattfindet. In Richtung Zahnkopf und -fuß nimmt die Gleitgeschwindigkeit zu, so dass – abhängig von der Drehzahl – immer in einem Teilbereich der Flanke Mischreibung vorliegt. Im Gegensatz dazu weisen Hypoidgetriebe (Kegelradgetriebe mit Achsversatz) im Betrieb an jeder Stelle der Zahnflanke zumindest in Zahnbreitenrichtung eine Gleitgeschwindigkeit auf. Aus diesem Grund ist der Schmierzustand im Zahnflankenkontakt günstiger, der Wirkungsgrad jedoch prinzipiell geringer.

Auch bei der Herstellung unterscheiden sich Kegelradverzahnungen grundlegend von Stirnradverzahnungen. Geschliffene Kegelräder weisen üblicherweise eine bogenförmige Zahnflankenglinie auf. Bei ihrer Herstellung kommen in aller Regel Topfschleifscheiben zum Einsatz (siehe Abbildung 6). Die Möglichkeit der Verwendung elastisch gebundener Werkzeuge zum Polierschleifen ist hierbei fragwürdig. Ein elastischer Hohlzylinder weist eine vergleichsweise geringe Formstabilität auf, was insbesondere beim Schleifen von Tellerrädern im vollflächigen Kontakt zu unerwünschten dynamischen Effekten und damit Geometrieabweichungen führen kann. Zudem würde sich das Werkzeug aufgrund der Zentrifugalkraft aufweiten, wodurch das Profil radial verschoben und verzerrt würde. Der Einsatz elastisch gebundener Werkzeuge erscheint daher für die Bearbeitung von Kegelrädern ungeeignet.

Wie kann vor diesem Hintergrund das Potenzial hochfeiner Oberflächen in einer Serienfertigung für den Sonderfall des Kegelradgetriebes möglichst effizient nutzbar gemacht werden?

### Feinschleifen von Kegelradgetrieben – eine Herausforderung

Naturgemäß lässt sich bei Verwendung einer Topfschleifscheibe nicht einfach parallel zu einem Schruppwerkzeug ein zweites Schlichtwerkzeug zur Erzeugung sehr feiner Oberflächen auf der Schleifspindel montieren. Entsprechend verbleiben für eine Serienfertigung vier Möglichkeiten: Erstens die Verwendung einer Maschine mit zwei Schleifspindeln. Zweitens der Wechsel des Schleifwerkzeugs zwischen dem Vor- und Feinschleifen. Diese beiden Varianten eignen sich nicht für eine Serienfertigung. Denn bei den verfügbaren modernen Kegelradschleifmaschinen mit der erforderlichen Genauigkeit der Steuerung von Abricht- und Schleifbewegung sowie dynamischer Steifigkeit handelt es sich um Einspindelmaschinen – und der Wechsel des Schleifwerkzeugs zwischen der Vor- und Feinschleifbearbeitung eines jeden Bauteils kann für einen Serienprozess kaum mit akzeptabler Wechselzeit realisiert werden. So verbleiben letztendlich nur noch die dritte und vierte Möglichkeit: das



Abbildung 7: Oerlikon Kegelrad-Schleifmaschine G 60

Vor- und Feinschleifen des Bauteils in zwei Aufspannungen und die Verwendung eines Schleifwerkzeugs, das die Erzeugung einer hohen Oberflächengüte bei akzeptabler Produktivität ermöglicht.

Bei einem Umspannen des Bauteils muss aufgrund der endlichen Genauigkeit der Spannvorrichtung, dem erneuten Einfädeln und der Verzahnungsqualität nach dem Vorschleifen für die Feinschleif-Bearbeitung ein Flankenmaß von etwa  $40 \mu\text{m}$  vorgesehen werden, um den auftretenden Abweichungen gerecht werden zu können. Dies führt zu größeren Bearbeitungszeiten beim Feinschleifen. Zudem ist das Beladen und Einfädeln zweimal erforderlich, so dass sich die bauteilbezogenen Nebenzeiten verdop-

pelt. Dennoch hätte auch dieses Vorgehen einen positiven Effekt: Das Bauteil könnte zwischen dem Vor- und Feinschleifen verfestigungsgestrahlt werden. Da hierbei auf die Oberflächengüte der Zahnflanke und etwaige Strahlauwürfe nur eingeschränkt Rücksicht genommen werden müsste, könnte die Tiefenwirkung der Strahlbehandlung erhöht werden. An der letztgenannten Möglichkeit – der Verwendung eines Schleifwerkzeugs, das sowohl eine hohe Oberflächengüte als auch eine zufriedenstellende Zerspanleistung ermöglicht – setzt die Strategie von Klingelberg an. Der besondere Charme dieser Lösung ist, dass das Feinschleifen auf diese Weise dem kleinstmöglichen Eingriff in bestehende Fertigungsabläufe umgesetzt werden kann.

Moderne Schleifwerkzeuge können mit den dazu passenden Abrichtwerkzeugen für ein breites Anwendungsspektrum konditioniert werden. Mit Hilfe des Abrichtprozesses wird zunächst ein sehr schnittfreudiges Werkzeug erzeugt, mit dem das Gros des Schleifaufmaßes zerspannt wird. Vor dem finalen Schliff werden die Abrichtparameter dann so gewählt, dass die gewünschte Oberflächengüte bei entsprechender Prozessführung sicher erreicht wird. Mit den Kegelrad Schleifmaschinen vom Typ Oerlikon G 30 für die Bearbeitung von PKW-Radsätzen und G 60 für den LKW-Bereich (siehe Abbildung 7) sind Maschinen am Markt, die alle Voraussetzungen hierzu mitbringen. Der steife Aufbau der Maschinen im Vertikalkonzept und die hohe Präzision bieten die optimalen Bedingungen für die Umsetzung des Feinschleifprozesses. Die leistungsfähige Kühlschmierstoffversorgung gewährleistet in Kombination mit der Hochdruck-Reinigungsdüse eine präzise einstellbare Prozesskühlung und Werkzeugreinigung. Die Prozesskühlung kann beim Werkzeugwechsel reproduzierbar positioniert werden und ist dank der CNC-gesteuerten Nachführung über der gesamten Nutzlänge der Schleifscheibe absolut konstant. Hierdurch ist eine dauerhaft schleifbrandfreie Fertigung gewährleistet. Eine Aufmaßkontrolleinrichtung überwacht zusätzlich taktzeitneutral die Geometrie der Serienbauteile, um eine thermische Gefügeschädigung aufgrund von Abweichungen im Schleifaufmaß auszuschließen. Die regelmäßige automatische Überprüfung des Abschleiffs stellt die gewünschte Verteilung des Aufmaßes zwischen beiden Flanken über dem Verlauf der Serie sicher.

### Fazit: Feinschleifen auf Klingelberg Kegelrad-Schleifmaschinen ermöglicht gesteigerte Leistungsfähigkeit von Kegelradsätzen

Die Erkenntnisse zur Tragfähigkeit feingeschliffener Stirnräder und zur Bearbeitung von Bauteilen aus der Luftfahrttechnik hat Klingelberg zusammengeführt und auf die Herstellung von Serien-Kegelrädern aus dem Automotive-Bereich übertragen. Die Kegelrad Schleifmaschinen G 30 und G 60 sind von ihrem Aufbau her per se bereits sehr gut für das Feinschleifen geeignet: Die Stabilität des Maschinenkonzepts, die Steifigkeit und die hohe Genauigkeit bilden die Basis für optimierte Prozesse. Die konstante und reproduzierbar einstellbare Kühlschmierstoffversorgung

kombiniert mit der Aufmaß- und Abschleifkontrolle sorgen für konstante Schleifergebnisse. Beide Maschinen ermöglichen so den direkten Einstieg in das Feinschleifen von Kegelrädern in der Serienproduktion.

Dass sich dieser Schritt lohnt, zeigen die Ergebnisse der auf der Oerlikon G 30 durchgeführten Schleifversuche. Gemäß Norm-Tragfähigkeitsberechnung kann das von den Zahnflanken übertragbare Drehmoment der Automotive-Radsätze durch die erzielte Oberflächengüte von weniger als  $Rz = 1 \mu\text{m}$  (siehe Abbildung 2) gegenüber der Serienanforderung von  $Rz = 8 \mu\text{m}$  um etwa 40 % gesteigert werden. Die zulässige Belastung des Zahnfußes kann ausgehend von einer ungeschliffenen Oberfläche immerhin um etwa 15 % vergrößert werden. Eine Verbesserung der Oberflächengüte hat also nachweislich das Potenzial, die Leistungsfähigkeit von Kegelradsätzen zu optimieren. Mit Hilfe der Oerlikon Kegelrad-Schleifmaschinen aus dem Hause Klingelberg lässt sich dieses Tragfähigkeitspotenzial für das Kegelrad in einer Serienfertigung effizient erschließen.

### Literatur

- [1] Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Kombination von Strahlbehandlung und Finishingprozess. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 521 I der FVA, 2010
- [2] Tragfähigkeit gestrahlter und gleitgeschliffener Zahnflanken unter besonderer Berücksichtigung der Randzonen- und des Schmierfilmzustands. Sachstandsbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 521 II der FVA, 2017
- [3] Graufleckentragfähigkeit von Großgetrieben III. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 286 III der FVA, 2010
- [4] Krantz, T. L.: The Influence of Roughness on Gear Surface Fatigue. U.S. Army Research Laboratory, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, 2005
- [5] Profilschleifen von Verzahnungen mit höchsten Oberflächenqualitäten. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 654 der FVA. In: Forschungsreport 2012 der FVA, 2012
- [6] Diskontinuierliches Zahnflankenprofilschleifen zur Erreichung höchster Oberflächengüten und Verzahnungsqualitäten – Superfinishing II. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 654 II der FVA. In: Forschungsreport 2016 der FVA, 2016



Dr. Rolf Schalaster  
Head of Competence Center  
Bevel Gear Grinding

**KLINGELNBERG GmbH**  
Peterstraße 45  
42499 Hückeswagen, Germany  
Fon: +49 2192 81-0  
info@klingelberg.com  
www.klingelberg.com