



GEAR GRINDING AND GEAR FUNCTIONS

ШЛИФОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ИХ ФУНКЦИИ

Dr.Ing-habil. Peter Schäcke

Reishauer AG , Zürich-Wallisellen , Switzerland
peter.schaecke@reishauer.com

The common goal of gearbox designers and gear manufacturers is the manufacturing of low noise gearboxes with increased performance at the same or even reduced gearbox size and at smallest cost.

This development is being explained for the hard end operation "Gear Grinding" from the viewpoint of the machine tool manufacturer for the newest Reishauer Gear Grinding Machine.

The discussion of the machine-based possibilities of influence for the following functional requirements are:

- Load carrying capability of tooth flank
- Load carrying capability of the root
- Kinematic accuracy and low noise

Inhalt

1. **Warum sind Zusammenhänge zwischen Verzahnungsmaschine und Zahnradfunktion wichtig?**
2. **Zahnflanken- und Zahnfuss-Tragfähigkeit**
 - 2.1. **Zahnflanken-Tragfähigkeit**
 - 2.2. **Zahnfuss-Tragfähigkeit**
3. **Kinematische Genauigkeit und Laufruhe**
 - 3.1. **Zahneingriffsfrequenz und Geräusch**
 - 3.2. **Maschinenstörfrequenzen und Geräusch**
 - 3.3. **Oberflächenstruktur und Geräusch**
4. **Zusammenfassung**

1. Warum sind Zusammenhänge zwischen Verzahnungsmaschine und Zahnradfunktion wichtig?

Das Ziel der Getriebeentwickler und der Zahnradhersteller ist es mit zunehmender Bedeutung, geräuscharmere Getriebe mit gesteigerter Leistungsdichte, aber unverändertem oder reduziertem Bauvolumen bei möglichst geringen Kosten zu produzieren.



Bild 1: Hartfeinbearbeitung durch kontinuierliches Wäzschleifen

Historisch war der Konstrukteur bei der höheren Leistungsdichte und der Geräuscharmheit der Getriebe auf sein entwicklungstechnisches Werkzeug der Getriebekonstruktion und der Verzahnungsauslegung orientiert. Die fertigungstechnischen Möglichkeiten wurden als Folgeschritt in die Projektarbeit einbezogen.

Heute muss es für den Entwickler möglich sein, die Voraussetzungen der Fertigungstechnik so in seine Überlegungen einzu beziehen, dass die erhöhte Zahnfußfestigkeit und Flankentragfähigkeit der Zahnräder sowie die gesteigerte kinematische Genauigkeit aus fertigungsbezogenen Korrelationen ableitbar werden. Diese Korrelationen zwischen dem Prozess der Hartfeinbearbeitung auf der Verzahnungsmaschine und den Zahnradfunktionen müssen bekannt sein und reproduzierbar genutzt werden können.



Bild 2: CNC-Verzahnungswälzschleifmaschine Reishauer RZ 400



Bild 3: CNC-Verzahnungswälzschleifmaschine Reishauer RZ 150

Diese Zusammenhänge widerspiegeln sich auch in den Entwicklungszielen der Werkzeugmaschinenhersteller.

So war es in der Vergangenheit wichtig, Maschinen für die Hartfeinbearbeitung zu entwickeln, die mit immer steigender Produktivität die hohen makrogeometrischen Zeichnungs-Anforderungen erfüllen konnten.

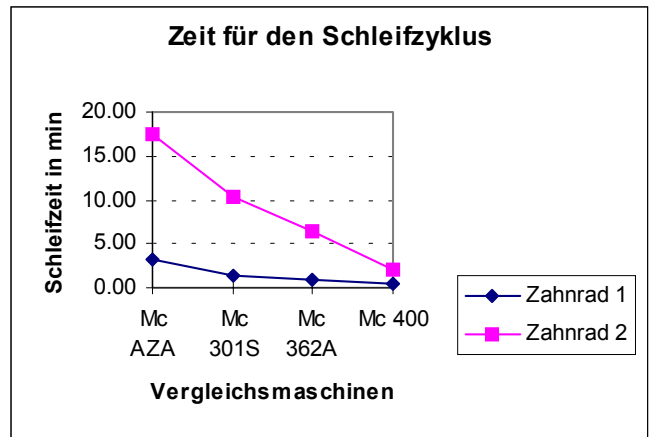


Bild 4: Entwicklung der Maschinenproduktivität

Zahnrad 1	Zahnrad 2
$m = 2 \text{ mm}$	$m = 5 \text{ mm}$
$z = 35$	$z = 45$
$\alpha = 16^\circ$	$\alpha = 20^\circ$
$\beta = 33^\circ$	$\beta = 16^\circ$

Die erste Zahnradschleifmaschine nach dem kontinuierlichen (Schraub-) Wälzschleifprinzip wurde von der Firma Reishauer 1945 zum Kauf angeboten.

In 15 jähriger Entwicklungsarbeit der Maschine ZA war in der heute über 200 Jahre bestehenden Firma Reishauer bereits der Zusammenhang zwischen verfahrensbedingten Kosten und Funktionsansprüchen „Wünschen“ erkannt worden.



Bild 5: Zahnflankenschleifmaschine ZA (1945)

Titelblatt des Prospektes für die erste Zahnflankenschleifmaschine Typ ZA. „In Zukunft werden auch dort Zahnräder geschliffen werden, wo dies bisher wünschenswert, der hohen Kosten wegen aber nicht möglich war“, verkündete damals der Werbetext. Er sollte recht bekommen!



Bild 6: Zusammenhang ZA und Kosten

Die Vergleichbarkeit der Kosten für die Verfahren der Hartfeinbearbeitung von Zahnrädern bekommt in der Gegenwart ihren tieferen Sinn durch die zunehmenden Ansprüche an die Funktionen der Zahnräder.

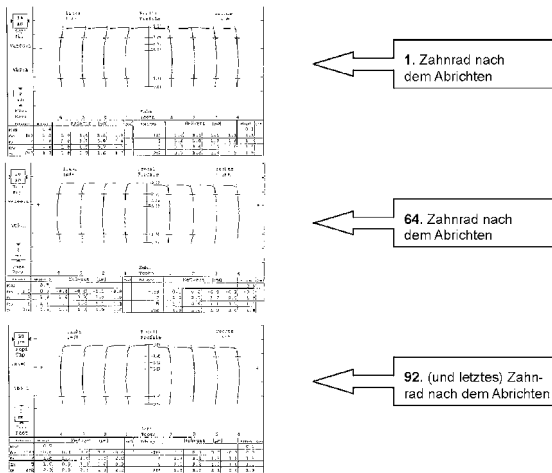
2. Zahnflanken- und Zahnfuß-Tragfähigkeit

2.1. Zahnflanken-Tragfähigkeit

Ist die Flankentragfähigkeit infolge einer Pittingbildung der begrenzendende Faktor zum Erreichen des geforderten übertragbaren Drehmoments, so sind alle negativen Einflussfaktoren wie instabiles Tragbild (Leistungsdichte!) und Randzonen-Zugeigenspannungen zu minimieren. Die serienstabile Präzision der Verzahnungsschleifmaschinen für die bestimmenden Flankenparameter Profilwinkel α und Schrägungswinkel β garantieren auch bei breiteren Verzahnungen reproduzierbare Tragbilder.

Die Spannweite der Profil-Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ beträgt für 92 Zahnräder weniger als $1 \mu\text{m}$. Diese Präzision lässt sich aus dem Shiftschleifen mit abrichtbaren Schleifwerkzeugen auf der RZ 400 ableiten. Während der gesamten Nutzungsdauer sind in der Kontaktzone mit den Zahnrädern ständig die gleichen optimalen Spannungsbedingungen anzutreffen. Ursachen dafür sind das kontinuierliche Shiften und das periodische Abrichten der Schleifkörper.

Mit dem garantierten Toleranzband aller Verzahnungsabweichungen in DIN 3 (RZ 400) können die Toleranzen für Profil und Flankenlinie so reduziert werden, dass das gewünschte Tragbild gezielt erreicht wird. Auch flexible, an Kraftverhältnisse angepasste Modifikationen sind für das Tragbild von grosser Bedeutung.



Werkstück	
Modul	1.0 - 1.25 mm
Zähnezahl	24
Zahnbreite	20 mm
Schrägungswinkel	18°
Schleifschnecke	
Gangzahl	5
Prozessdaten	
Zykluszeit-Schleifen	0.52 min
Boden-Boden-Zeit	0.84 min
Qualität: Profil-Formabweichung	
Zahnrad Nr. 1	DIN 2
Zahnrad Nr. 64	DIN 2
Zahnrad Nr. 92	DIN 2

Bild 7: Reproduzierbare Profil-Winkelabweichungen

Auf der RZ 400 können die Eigenspannungszustände an den Zahnflanken durch Variation von technologischen Prozessdaten gezielt beeinflusst werden. (Bild 8)

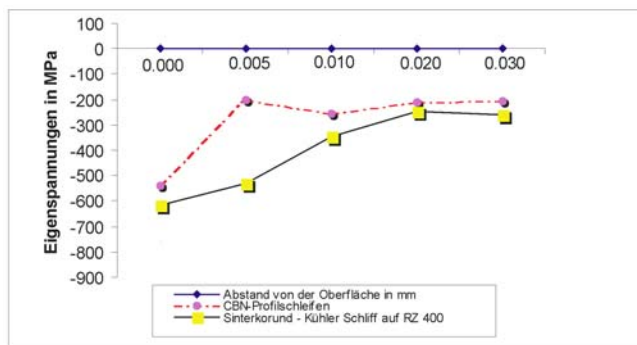


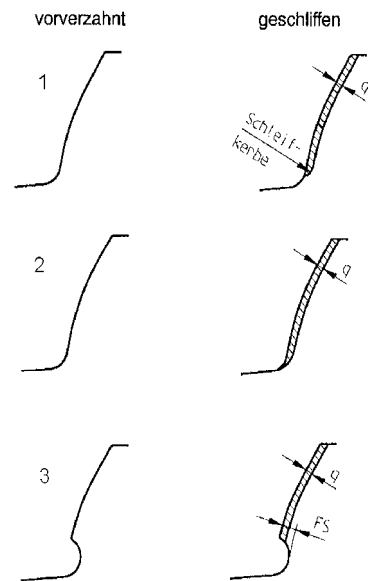
Bild 8: Randzonen-Druckeigenspannungen beim Schleifen

2.2. Zahnfuß-Tragfähigkeit

Bei Steigerung des übertragbaren Drehmoments sind wegen der auftretenden Zahnbruchgefahr im Fussbereich die technologischen Möglichkeiten durch die Reishauer-Schleifmaschinen besonders zu berücksichtigen. (Bild 9)

Die Variante 1 ist wegen der Bruchgefahr nicht mehr zulässig.

Die verschleissfesten Korund-Schleifschnecken können in Verbindung mit dem Leistungs-Shiftschleifen den Fussradius (Variante 2) ohne Verlust an Produktivität ausschleifen. Auch das komplette Ausschleifen des Fusses ist möglich. Es findet zunehmend im Pkw-Getriebebau und aus funktionalen Gründen im Pumpenbau Anwendung. Das Schleifschneckenprofil lässt sich auf der RZ 400 durch die verschiedenen Abrichtvarianten so anpassen, dass die unterschiedlichsten Zahnfußkurven oder der komplette Zahnfuß geschliffen werden kann.



q Bearbeitungszugabe

FS Freischnitt

Bild 9: Zahnfußgestaltung und Schleifen

3. Kinematische Genauigkeit und Laufruhe

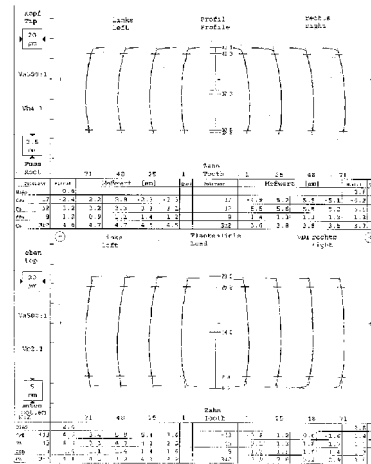
3.1. Zahneingriffsfrequenz und Geräusch

Eine Korrelation zwischen der Verzahnungsschleifmaschine und der Zahnradfunktion Laufruhe hat ihre Ursache in den zyklischen Formabweichungen der Verzahnungen bei der Hartfeinbearbeitung. Sie bedingen kinematische Abweichungen mit Zahneingriffsfrequenz und ihren Harmonischen und somit Getriebegeräusche. In der prozesstechnischen Einflussnahme auf die zyklischen Formabweichungen durch gezielte Mehrgängigkeit beim Schleifen werden die zyklischen Formabweichungen eliminiert. (Bild 10) Durch regelbare hohe Steifigkeit im Wälzmodul und Feinwuchten werden maschinenseitige Einflüsse wirksam.

Ein weiterer Geräuscheinfluss resultiert aus den mit Zahneingriffsfrequenz und ihren Harmonischen auftretenden Laufungleichmässigkeiten infolge konstruktiv bedingter Schwankung der wirklichen Zahnverformung unter Last.

Gezieltes Modifizieren des Profils und/oder der Flankenlinie bieten eine gute Lösung, um verformungsbedingte auftretende Anregungen des Geräusches zu verringern.

Die auf den aktuellen Reishauer-Schleifmaschinen vorhandene Variationsfreiheit hinsichtlich Profil bietet die Voraussetzung um die computergestützt berechneten Modifikationen zur Anregungsminimierung gezielt auf der Maschine zu erzeugen. Diese Möglichkeit bietet noch viele ungenutzte Ressourcen.



Werkstück	
Modul	2.00 – 2.25 mm
Zähnezahl	93
Zahnbreite	28 mm
Schrägungswinkel	22 °
Schleifschnecke	
Gangzahl	7
Prozessdaten	
Zykluszeit-Schleifen	0.85 min
Boden-Boden-Zeit	1.14 min
Flexibilität	
Geometrie	Hochverzahnung
Finalprodukt	Frontantriebsrad/PKW
Losgrösse	Grossserie

Bild 10: Hohe Profilgenauigkeit und hohe Produktivität

3.2. Maschinenstörfrequenzen und Geräusch

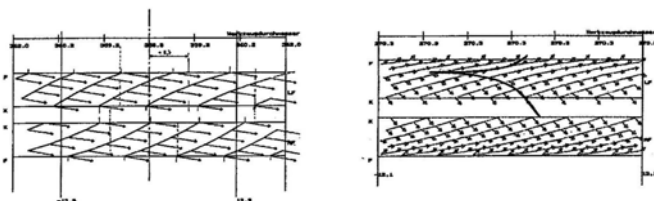
Kinematische Abweichungen mit Maschinenordnungen – sogenannte „Geisterfrequenzen“, die im Drehzahlbereich $> 3000 \text{ min}^{-1}$ störend auftreten können, werden durch den konstruktiven Aufbau und die realisierten Prinzipien zur Wälzbewegungs-Erzeugung bei der RZ-Maschinen fast vollständig vermieden und unterdrückt. Signifikante Ursachen für Maschinenordnungen im hörbaren Bereich wie WZ-Antrieb, Polpaarzahl von E-Motoren u.a. wurden bereits in das Maschinenkonzept einbezogen und eliminiert. Umfangreiche Testreihen im Pkw-Getriebereich in dem geräuschsensiblen Gebiet der Niederflur-Fahrzeuggetriebe und im Bereich der Masseausgleichsgetriebe (sehr empfindliche Reaktion auf Maschinenordnungen) haben diesen Weg zur Geräuschminimierung bestätigt.

3.3. Oberflächenstruktur und Geräusch

Kinematische Abweichungen mit Störordnungen, deren Ursache in der Oberflächenstruktur (Welligkeiten, auch als sogenannte „Waschbrettstruktur“ bekannt) begründet ist, haben in der Vergangenheit oft zum Entscheid geführt, verfahrensfremde Verzahnungen miteinander zu paaren. Die Wirkung liegt im Drehzahlbereich der Zahnräder von $< 3000 \text{ min}^{-1}$. Um die regelmäßige Struktur der Oberflächenwelligkeiten zu verändern, wurde/wird zum Teil nach dem Schleifen noch das Honen als zweites Bearbeitungsverfahren integriert. (Bild 11)

Wichtig für die geänderte Oberflächenstruktur ist die „Zerstörung“ der systematischen Schleifspuren, so dass keine durchgängigen Schleifspuren miteinander wälzen können. Diese Philosophie hat sich bei der RZF mit der Kombination kontinuierliches Profilschleifen und Touch-Honen sehr bewährt. Nach anfänglicher Skepsis über den Anwendungsgrad von nur an der Spitze gehonten Teilwelligkeiten kann heute von einem weltweiten Erfolg dieser Technologie zur Geräuschminimierung berichtet werden.

Genau das gleiche Ziel, nämlich „Zerstörung“ der systematischen Wellenstrukturen wird beim Schleifen auf den Reishauer-Wälzschleifmaschinen mittels des integrierten Softwaresystems LNS (LNS = Low-Noise-Shifting) im Einstufenprozess (ohne Honen) erreicht. Diese Verfahrensvariante wirkt so auf die Oberflächenstruktur ein, dass die aus der Schleifstruktur resultierenden Anregungen vermieden werden.



Oberflächenstruktur geschliffener Zahnräder

Oberflächenstruktur gehonter Zahnräder

Bild 11: Oberflächenstruktur geschliffener und gehonter Zahnräder nach RZF-Bearbeit

Die Variante 3 verliert aus oben genannten Gründen an Bedeutung, da im Zahnfußbereich (30° - Tangente) geschliffene Zahnräder reproduzierbar bessere Bedingungen bringen als durch Vorbearbeitungsfehler beeinflusste Protuberanzgeometrien.

Eine weitere Lösung für die verbesserte Zahnfußfestigkeit besteht in der Verbesserung der Randzonen-Druckeigenspannungen im Zahnfuß durch Schleifen. Da im kritischen Zahnfußbereich (30° - Tangente) und bei geforderter hoher Produktivität nur Schleifverfahren mit abrichtbaren Werkzeugen (Korund-Schnecken) zur Anwendung kommen können, tragen diese Werkzeuge noch einmal wesentlich zur Erhöhung der Druckeigenspannungen und ihrer Eindringtiefe im Zahnfußbereich bei.

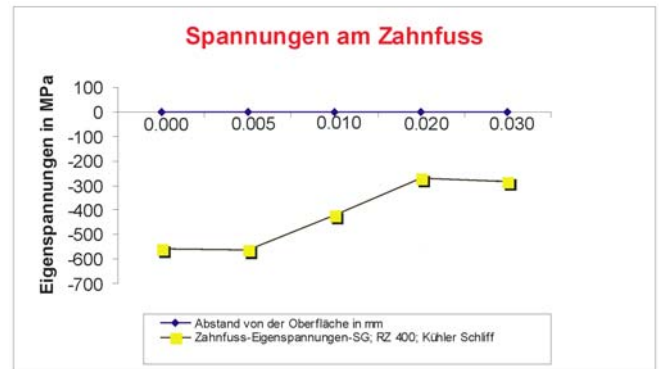
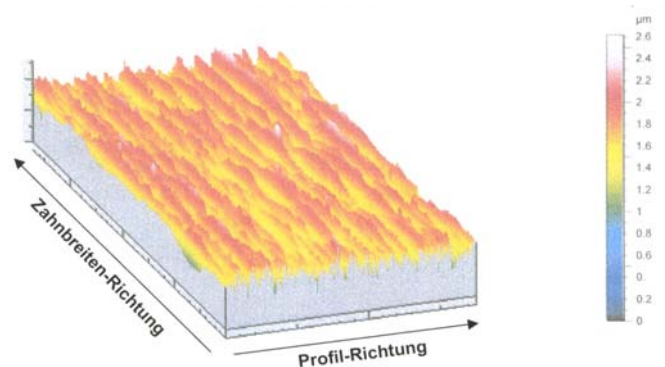


Bild 12: Randzonen-Druckeigenspannungen am Zahnfuß



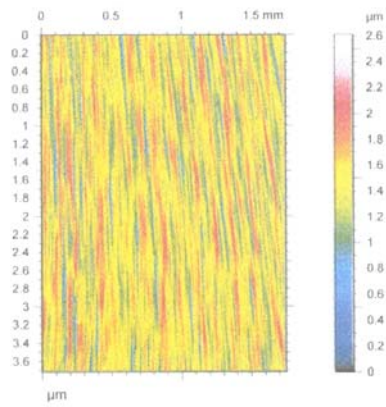


Bild 13: Oberflächenstruktur durch Low-Noise-Shifting

Durch umfangreiche Testreihen von Zahnradstufen (LNS-geschliffen) kann die Effizienz der Methode bestätigt werden, kinematische Genauigkeit (Laufruhe) auch aus technologischer Sicht zu bestimmen.

4. Zusammenfassung

Durch die enge Verknüpfung von fertigungstechnischen Einflüssen wie der Maschine, Werkzeugen, Verfahren mit den funktionellen Anforderungen an das Getriebe, ist das getrennte Planen von Getriebefunktionen in der Konstruktion und das Erreichen der Funktion in der Produktion nicht mehr sinnvoll. Die Schleifmaschinen der Firma Reishauer werden heute so entwickelt, dass die zusätzlichen Funktionsansprüche wie Tragfähigkeit, kinematische Genauigkeit und Laufruhe an die Verzahnungen durch die Prozesse und Maschinenelemente weitgehend beeinflusst werden. In einem wechselseitigen Lernprozess werden die Korrelationen zwischen den Verzahnungsmaschinen in der Hartfeinbearbeitung und den Zahnradfunktionen in die Maschine integriert. Dem Getriebe-Entwickler stehen rechnergestützte Module zur Verfügung, um gezielt diese Tragfähigkeit und die kinematische Genauigkeit (Laufruhe) auch aus technologischer Sicht zu bestimmen.