

## Innovationen beim hochproduktiven Wälzschleifen

Im Vergleich zu der visionären Industrie 4.0-Welt wirkt der Werkzeugmaschinenbau geradezu bodenständig. Dabei überrascht selbst eine so ausgereifte Technik wie die Verzahnungsbearbeitung mit enormen Zuwächsen an Geschwindigkeit und Qualität. Der Artikel zeigt dies am Beispiel von Wälzschleifmaschinen eines Coburger Herstellers.

Verzahnungszentren zum Wälzschleifen zielen auf die hohen Produktionsvolumina der Großserien- und Serienfertigung, welche für immer höhere Anforderungen in den Bereichen Kosten, Energie und Umwelt bekannt sind. Maschinen- und Prozessentwickler reagieren darauf mit Lösungen, die über technologische Grenzen hinausgehen. Im Folgenden werden hier vier Entwicklungen der Unternehmensgruppe KAPP NILES vorgestellt, die der bewährten Technik neue Einsatzbereiche erschließen und sie noch effizienter machen.

### Machbarkeit – Wälzschleifen von Zahnrädern mit Störkonturen

Schnittgeschwindigkeiten zwischen 63 und 80 m/s sorgen beim Wälzschleifen für hohe Produktivität. Diese werden mit den gängigen Werkzeugen – Schleifschnecken mit einem typischen Durchmesser von 300 mm – bei rund 5.000 - 7.500 U/min erzielt. Der große Werkzeugdurchmesser schafft jedoch Probleme bei Störkonturen, denn das Werkzeug benötigt Platz für Ein- und Auslauf während des Schleifhubes. Typische Beispiele sind ein Lagersitz mit einem Fräserauslauf nach der Vorbearbeitung oder eine größere Verzahnung nahe an der zu bearbeitenden Stelle (Bild 1).



**Bild 1:** Wälzschleifen eines Zahnrades mit Störkontur, hier ein benachbartes Zahnrad

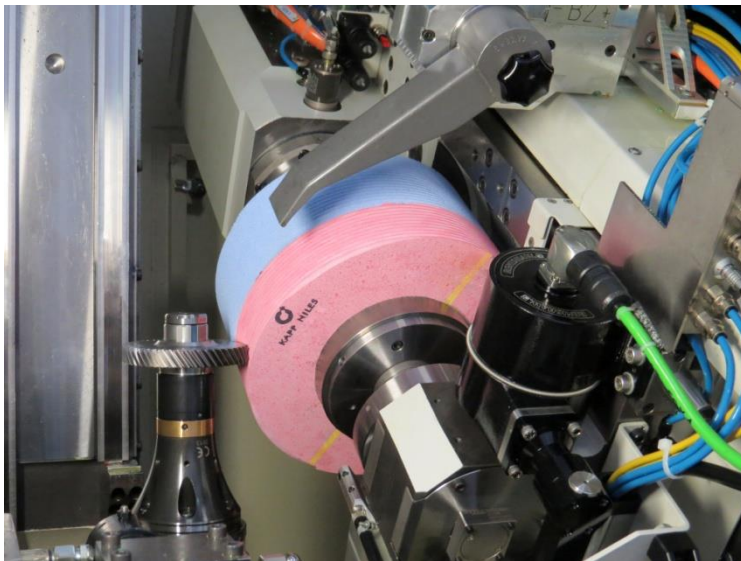
Will man für derartige Werkstücke nicht auf das zeitintensive Profilschleifen ausweichen, muss man die Schleifschnecken miniaturisieren. Diese müssen sich jedoch sehr viel schneller drehen, um die Schnittgeschwindigkeit eines normal großen Werkzeugs zu erreichen.

Herkömmliche Verzahnungsschleifmaschinen sind den dabei auftretenden dynamischen Anforderungen an Werkzeug- und Werkstückantrieben nicht gewachsen. Mit Neuentwicklungen von KAPP NILES, den Verzahnungszentren KX 160 TWIN und KX 260 TWIN, ist dies nun möglich. Abrichtwerkzeug, Werkzeug und Maschine sind eigens aufeinander abgestimmt. Dr. Sergiy Grinko, Projektverantwortlicher bei KAPP NILES, beschreibt dies näher: „Dank Hochgeschwindigkeits-Schleifspindeln können erstmals Verzahnungen wälzgeschliffen werden, die Werkzeugdurchmesser von nur 55 mm erfordern. In Verbindung mit der maximal möglichen Breite dieser Werkzeuge von 180 mm können damit – bei in der Serienfertigung bekannten Qualitätsanforderungen – Bearbeitungszeiten und -kosten realisiert werden, die bisher bei störkantenkritischen Verzahnungen unerreichbar waren.“ Die Werkzeugantriebe der Maschinen erreichen 25.000 U/min. Das Werkstück muss sich ebenfalls schneller mit drehen. Hier hat KAPP NILES einen Startvorteil: Bereits bei den Standardmaschinen leistet der Werkstückantrieb 5.000 U/min. Dr. Grinko hat für das Werkstück eines Kunden die Bearbeitungszeiten durchkalkuliert. Das Ergebnis: Abrichtfreies Profilschleifen mit einer CBN-Scheibe benötigt eine Maschinenlaufzeit von 5,4 min. Beim abrichtbaren Wälzschleifen beträgt sie nur 2,9 min bei einem Abrichtintervall von 25 Teilen.

### **Qualität in der Mikrogeometrie – Feinschleifen**

Ein Finish-Verfahren, wie Feinschleifen, kann die Betriebseigenschaften eines Werkstücks erheblich verbessern. Reduziert man zum Beispiel die Oberflächenrauheit von Zahnflanken, lassen sich niedrigviskose Getriebeöle einsetzen. Als Folge steigt der Wirkungsgrad des Getriebes, ohne dass dies mit Festigkeitsnachteilen erkauft werden muss. Die dafür benötigten 80 - 90 % Traganteil einer Oberfläche erreicht man beim Feinschleifen durch mechanisches Abtragen der Rauheitsspitzen. Dem stand bisher ein Problem im Weg: Die nötigen Oberflächengüten erreichte man nur mittels zeitraubender Verfahren, wie dem Gleitschleifen. Dabei werden die Werkstücke zusammen mit kleinen Schleifkörpern, einer wässrigen Lösung und einem Zusatzmittel in eine Vibrationswanne

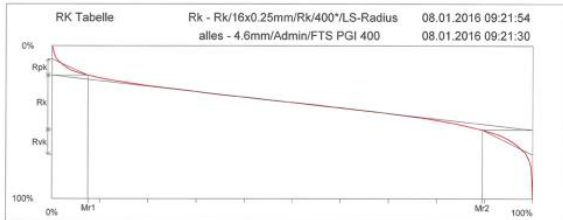
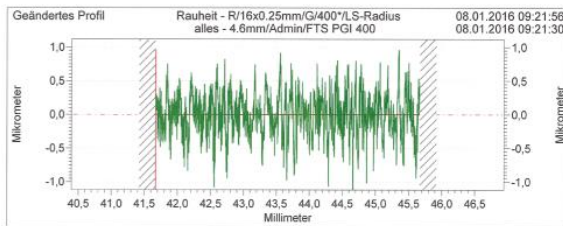
gegeben. Das Verfahren liefert sehr gute Resultate, benötigt aber je nach Werkstück unter Umständen mehrere Stunden. Zum Vergleich: In der Serienfertigung kalkuliert man mit einer Minute pro Zahnrad. Sergiy Grinko: „Serienfertiger von Getrieben benötigen automatisierte Prozessketten, idealerweise im one-piece-flow. Das ist mit derartig unterschiedlichen Bearbeitungszeiten nicht machbar.“ Er spricht auch ein weiteres Problem an: „Gleitschleifen erfordert Additive, das heißt Chemikalien, die im Prozess, beim Recycling bzw. der Entsorgung den Anwender mit vielen Vorschriften und Sicherheitsmaßnahmen konfrontieren. Aus Produktionsgründen wäre es dann zweckmäßig die vorhandenen Schleifmaschinen mit einem Feinschleifprozess in die Prozesskette zu integrieren.“ Dass dies machbar ist, hat die Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) im Projekt 654 I nachgewiesen: Beim Feinschleifen mit konventionellen Verzahnungsschleifmaschinen lassen sich Oberflächengüten von  $Rz \leq 1 \mu\text{m}$  erzielen. Dafür hat KAPP NILES spezielle Kombi-Werkzeuge mit zwei Funktionsbereichen im Einsatz (Bild 2).



**Bild 2:** Kombiniertes Werkzeug mit konventionellem und Feinschleif-Anteil

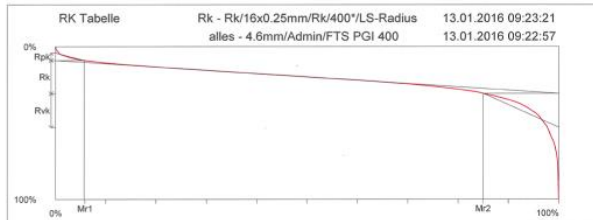
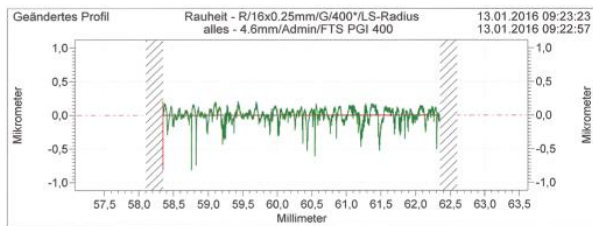
Mit diesen können in einer Aufspannung Verzahnungen mit Oberflächengüten im Bereich von  $Rz 0,5 - 1 \mu\text{m}$  auf neuen KAPP NILES Wälzschleifmaschinen (KX Serie und ZX Serie) hergestellt werden (Bild 3).

### Oberflächenbeschaffenheit vor dem Feinschleifen



Rpk	0,2527	µm	Rk	0,8619	µm	Rvk	0,3916	µm
Mr1	7,59	%	Mr2	89,46	%	Rvk/Rk	0,4544	
Rz	1,6263	µm	Rt	2,3716	µm			
Ra	0,2482	µm	Rsk	-0,2124		Rku	3,3138	
R3z	0,9354	µm	R3y	1,2118	µm	Rz1max	2,2163	µm
Rmr(c) (1)	22,80	%	Schnitttiefe	-0,250	µm	mr%	5,00	%

### Oberflächenbeschaffenheit nach dem Feinschleifen



Rpk	0,0513	µm	Rk	0,2263	µm	Rvk	0,2323	µm
Mr1	5,85	%	Mr2	84,93	%	Rvk/Rk	1,0268	
Rz	0,5434	µm	Rt	1,0163	µm			
Ra	0,0751	µm	Rsk	-1,6687		Rku	8,4048	
R3z	0,2072	µm	R3y	0,5261	µm	Rz1max	0,9710	µm
Rmr(c) (1)	89,84	%	Schnitttiefe	-0,250	µm	mr%	5,00	%

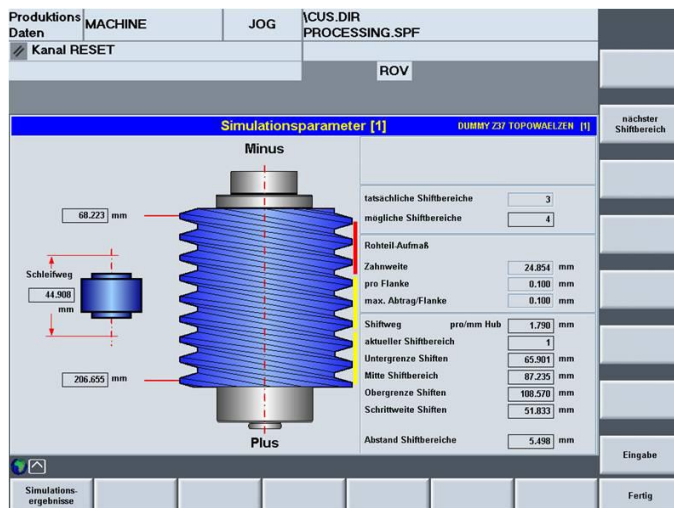
**Bild 3:** Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit vor und nach dem Feinschleifen

Bei Schnittgeschwindigkeiten von bis zu 63 m/s beträgt der zusätzliche Zeitaufwand im Regelfall weniger als 50 % der Bearbeitungszeit der konventionellen Schleifbearbeitung. Sergiy Grinko beschreibt die Entwicklung bei KAPP NILES: „Die Fertigung mit Wälzschleifen ist wesentlich produktiver als Profilschleifen mit einer Feinschleifscheibe. Wir bringen hierfür die Erfahrung mit, das richtige Breitenverhältnis der beiden Schleifbereiche zu wählen und per Software optimal zu nutzen.“

### Qualität in der Makrogeometrie – Topologisches Wälzschleifen

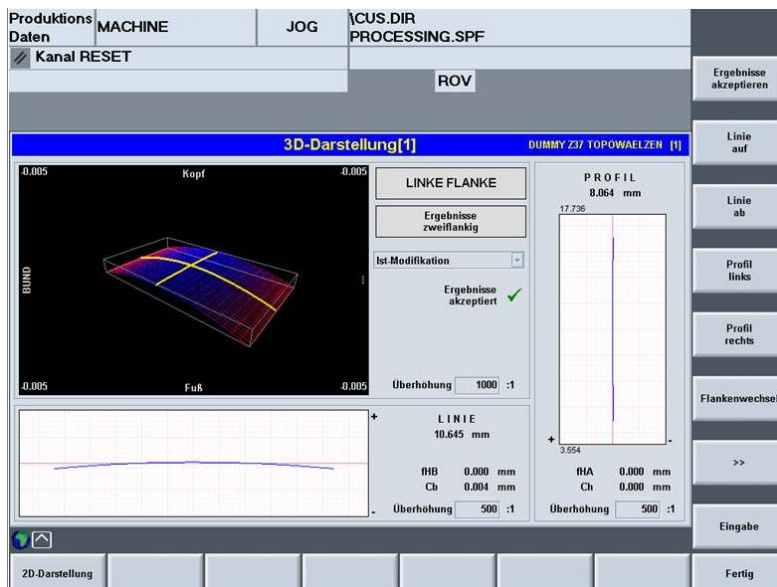
Verzahnungen sind in den seltensten Fällen unmodifiziert: Die einfache Evolvente existiert im Lehrbuch, nicht in der Praxis. Dort müssen die Konstrukteure Toleranzen, wie Lagefehler der Achsen, berücksichtigen: Die Zahnflanke wird mit einer Balligkeit von wenigen µm versehen. Wären sie unmodifiziert, würde sich der geringste Lagefehler negativ auf Tragfähigkeit und Geräuschemission auswirken. Soll so eine Verzahnung mittels Wälzschleifen produziert werden, stellt dies besondere Anforderungen an die Maschine: Beim Schleifen muss der Achsabstand zwischen Werkzeug und Werkstück kontinuierlich geändert werden. Durch die Lage der Berührlinien und der Achsabschnitte

führt dies jedoch zu einem "Abbildungsfehler": Statt einer symmetrischen Wölbung kommt es zu einer Flankenverzerrung. Dr. Sergiy Grinko erläutert: „In der Regel will man Verschränkungen nicht einfach eliminieren, sondern gezielt beeinflussen. Wenn der Kunde genau weiß, welche Last auftritt und wie sich seine Bauteile hierbei verformen, kann er den besten Wälzkontakt für diese Anwendung berechnen. Manchmal ist auch die Geräuschemission bei einer minimalen Verschränkung besser als ganz ohne.“ Selbst eine derart komplexe Verzahnung lässt sich per Wälzschleifen herstellen. Hierzu müssen einerseits während des Schleifprozesses bestimmte Achsbewegungen miteinander abgestimmt werden, so dass eine feste Verbindung zwischen Shift- und Vorschubbewegung geschaffen wird. Andererseits benötigt man ein modifiziertes Werkzeug: Die Schleifschnecke muss Bereiche mit unterschiedlicher Geometrie aufweisen, die gezielt eingesetzt werden. Beim Abrichten lassen sich diese Bereiche mit Standardwerkzeugen erzeugen. Es liegt auf der Hand, dass die Berechnung der Schneckengeometrie und der eigentliche Bearbeitungsprozess eine sehr leistungsfähige Software erfordern. Einige Hersteller führen diese Berechnungen im eigenen Haus durch und spielen die Daten anschließend in die Maschine des Kunden ein. Dies kostet jedoch Zeit. Insbesondere bei der Prototypenfertigung oder Tests zieht jede noch so geringe Modifikation einen längeren Maschinenstillstand nach sich. Bei KAPP NILES hat man deshalb einen anderen Weg eingeschlagen. Dr. Grinko beschreibt ihn: „Beim topologischen Wälzschleifen steht bei uns eine bedienerfreundliche Benutzerführung und die maschineninterne Berechnung aller notwendigen Daten, bzw. Abricht- und Schleifbahnen im Vordergrund. Der Kunde hat bei uns von der Simulation über die Fertigung bis hin zur Kontrolle in 2D- und 3D-Darstellung alle Möglichkeiten, die Verschränkung in seinem Sinn zu beeinflussen.“ Nach der Dateneingabe wird die Schneckenbreite mit einer maximal möglichen Anzahl der Shiftbereiche versehen (Bild 4).



**Bild 4:** Eingabemaske mit Anzeige der möglichen Shiftbereiche

Dr. Grinko erklärt dies näher: „Beim topologischen Wälzschleifen möchte man möglichst viele Bereiche auf der Schnecke haben, um die Schnecke maximal auszunutzen. Allerdings müssen diese Bereiche groß genug sein, um die gewünschte Geometrie zu erzeugen“. Die generierte Anzahl wird vom Maschinenbediener übernommen und auf der Simulationsseite kontrolliert (Bild 5).



**Bild 5:** Die Simulation erlaubt es, die erzeugte Topologie bereits vor der Fertigung zu kontrollieren

Wird der Maschinenbediener mit Werkzeugverschleiß und Qualitätsverlust beim Schleifen infolge einer hohen Anzahl der Shiftbereiche konfrontiert, ist es möglich diese Anzahl zu reduzieren und somit die bestmögliche Verzahnungsqualität zu gewährleisten.

### **Geschwindigkeit – Mehrmilliges Abrichten**

Ein wesentlicher Vorteil des Wälzschleifens ist die Zeitersparnis. Durch die Verwendung hoher Gangzahlen am Werkzeug kann die Vorschubgeschwindigkeit erhöht und die Bearbeitungszeit entsprechend verringert werden. Als nächster Schritt zur Zeitreduzierung war es zweckmäßig, die Abrichtzeiten zu verringern. Dies gelang durch das gleichzeitige Abrichten mehrerer Gänge mit einem Abrichtwerkzeug (Bild 6).



**Bild 6:** Mehrmilliges Abrichten einer Korundschncke spart Zeit

KAPP NILES hat dieses Verfahren genau untersucht, um alle Verbesserungspotenziale auszuschöpfen. Dies beginnt bei der Fertigung des Abrichtwerkzeugs, wie es Dr. Sergiy Grinko beschreibt: „Mehrmilliges Abrichten erfordert Vollprofilabrichtrollen, Werkzeuge, die keinen separaten Kopfabrichter brauchen. Zur Herstellung nutzen wir das so genannte Negativverfahren.“ Bei diesem Verfahren werden Diamantkörner nicht direkt auf den Grundkörper, sondern in eine Negativform aufgebracht und vernickelt. Danach wird diese abrasive Form mit einem separat hergestellten Grundkörper verheiratet.

Um die Abrichtzeit möglichst gering zu halten, müssen die Anzahl der Rillen an Abrichtrolle und Schnecke aufeinander abgestimmt sein. Im Idealfall sind sie gleich, so dass für eine Zustellung nur ein Hub nötig ist. Aus technologischen Gründen ist dies jedoch nicht immer möglich. Bei einer Kombination aus fünf Gängen an der Schnecke und drei Rillen an der Rolle würde letztere jedoch ungleichmäßig verschleifen. Um dies zu vermeiden und damit die Standzeit der Rolle zu erhöhen, arbeiten Maschinen von KAPP NILES mit einem Algorithmus, der für eine gleichmäßige Abnutzung sorgt.

## **Fazit**

Die Beispiele belegen, dass selbst bei einer bewährten Technik wie dem Wälzschleifen noch große Fortschritte bzgl. Produktivität und Qualität möglich sind. Zu den schnelleren Antrieben, den neuen Werkzeugkonzepten und den intelligenten Steuerungen kommen auch noch Verbesserungen hinzu, wie beispielsweise das vollautomatische Umrüsten der Spannmittel oder integrierte Automationslösungen in der neuen Pick-Up Wälzschleifmaschine. In der Summe erzielt man mit diesen Maßnahmen Bearbeitungszeiten und -qualitäten, die vor wenigen Jahren noch undenkbar waren.