

NEUES ZUR SPEED VIPER

## SPEED VIPER MIT INNOVATIVEN FEATURES



Die Höfler Stirrad-Wälzschleifmaschine Speed Viper ist optimal auf das Produktionsumfeld von Industrie 4.0 ausgelegt und steht wie kaum ein anderes Maschinenkonzept für hochproduktives Wälzschleifen in der Großserie. Sie hat dabei sowohl das Vertrauen der Branche als auch einen iF Design Award gewonnen. Klingelberg hat diese erfolgreiche Plattform nun weiterentwickelt: Neue Features nehmen das Geräuschverhalten von Getrieben in den Fokus und ermöglichen eine längere Einsatzdauer der Schleifscheiben.

**H**öchstmögliche Produktivität, sichere Prozesse und leichte Bedienbarkeit sind die Erfolgsfaktoren eines Produktionssystems. Das gilt insbesondere für die Zahnradfertigung. Denn hier spielt nicht nur die messbare Geometrie der Zähne eine wesentliche Rolle, sondern auch weichere Faktoren wie das Geräuschempfinden. So schlägt sich mancher Zahnradexperte im Alltag neben Härteverzügen auch mit Höherharmonischen und Geisterordnungen herum, die Akustiker in Getrieben entdecken. Und wenn es gelingt, hier gute technische Resultate abzuliefern, kommt die nächste Hürde: der Kostendruck.

## Ein cyber-physisches Produktionssystem

Mit der Speed Viper Maschinenfamilie hat Klingelnberg ein innovatives Konzept auf den Weg gebracht, das in ein cyber-physisches Produktionssystem eingebettet ist. Die vollumfängliche Digitalisierung erzeugt für jeden Schritt im Entwicklungs- und Produktionsprozess ein digitales Abbild. So lassen sich kostspielige Nachbesserungen vermeiden und „nebenbei“ entsteht völlige Transparenz.

Das beginnt bereits bei der Verzahnungsauslegung. Um ein Hochleistungsgetriebe zu entwickeln, werden Zahnflankenmodifikationen angewandt, damit trotz temperatur- und lastbedingter Verformungen der Komponenten in allen Betriebspunkten ein gutes Geräusch- und Lastlaufverhalten gegeben ist. Diese Zahnflankenmodifikationen erfolgen nach funktionalen Gesichtspunkten. Wie genau sich das auf einem existierenden Maschinenpark mit den vorhandenen Werkzeugen umsetzen lässt, ist eine der vielen Herausforderungen in der Fertigung.

An diesem Punkt hilft die Dualität eines cyber-physischen Produktionssystems: Ob sich die gewünschte geometrisch ideale Zahnflankenform wirtschaftlich herstellen lässt, prüft die Software Gear Designer. Sie berechnet anhand einer Herstellsimulation und den vorhandenen Freiheitsgraden in der Produktion eine tatsächlich herstellbare Zahnflankenmodifikation. Dabei ergeben sich natürlich Abweichungen zwischen dieser berechneten und der ursprünglich gewünschten Modifikation. Der Vorteil der Gear Designer Software liegt darin, dass dem Konstrukteur vorab alles aufgezeigt wird, was später ohnehin in der Fertigung passiert. Statt langwie-

## SCHNELLESEINFO

Drei Highlights der Speed Viper Familie auf einen Blick:

- Die Speed Viper Plattform ist in ein cyber-physisches Produktionssystem eingebettet, das einen Closed Loop sowohl für die Produktion als auch für die Entwicklung ermöglicht.
- Mit QSS – Quiet Surface Shifting – lassen sich die Rauheitswerte der Zahnflanken hinsichtlich eines positiven Geräuschverhaltens modulieren.
- Über adaptives Shiften erzielt Klingelnberg eine längere Einsatzdauer der Schleifscheibe bzw. vergrößert die Anzahl der Teile, die geschliffen werden können.



## DER FILM ZUM GEAR DESIGNER:



Abb. 1: Das cyber-physische Produktionssystem von Klingelnberg

## Kompakt

### QSS – Quiet Surface Shifting

Das Geräuschverhalten von Verzahnungen allein über das Ordnungsspektrum zu bewerten, greift zu kurz. Die psychoakustischen Kennwerte Schärfe und Tonalität werden in hohem Maße durch die Rauheit der Zahnflanken beeinflusst – und diese lässt sich durch das Verfahren QSS von Klingelnberg gezielt modulieren.

riger und teurer Prototypen-Phasen kann bereits vorab in der Konstruktion bewertet und optimiert werden. Am Ende der Entwicklung steht der digitale Zwilling eines Zahnrads, der genau in dieser Form auch als real zu fertigendes Bauteil herstellbar ist. Herzlich willkommen in der Welt der cyber-physischen Produktionssysteme!

Ein weiterer Vorteil dieses Prinzips ist die Erfassung der reinen Fertigungsabweichung aus den Messdaten der klassischen Stirnradmessung. Nur deshalb ist das Programm Gear Corrector in der Lage, automatisch Fertigungsabweichungen zu minimieren, indem korrigierte Einstellwerte der Maschinenbewegung oder – falls erforderlich – des Abrichtprozesses erzeugt werden. Somit gibt es einen Closed Loop für die Produktion, der Fertigungsabweichungen automatisch minimiert, und einen Closed Loop für die Entwicklung, der fertigungs- und anforderungsgerechte Zahnflankenmodifikationen erzeugt.

Nun weiß jeder, dass selbst bei präziser Zahnradgeometrie das Geräuschempfinden anderen Gesetzmäßigkeiten folgt. Je präziser ein Zahnrad gefertigt wurde, desto deutlicher treten einzelne Ordnungen im Spektrum zutage. Soll man deshalb ein Zahnrad absichtlich in schlechterer Qualität fertigen? Das würde sicherlich das Geräuschempfinden verändern – aber es darf bezweifelt werden, ob das der richtige Ansatz ist. Dennoch muss man sich bei allen Genauigkeitsüberlegungen über technisch und wirtschaftlich vertretbare Fertigungstoleranzen Gedanken machen.

das Geräuschempfinden eines Getriebes in der Psychoakustik mittlerweile brauchbare Kennwerte wie Lautheit, Schärfe, Tonalität, Rauigkeit, Schwankungsstärke etc. gibt, ziehen viele Experten auch heute immer noch das Ordnungsspektrum zur Bewertung des Geräuschverhaltens heran. Dazu wird die Abweichung von der drehfehlerfreien Übertragung mittels Fourier-Transformation in ein Ordnungsspektrum überführt. Dabei entspricht die erste Ordnung einer Umdrehung des zu bewertenden Zahnrades. Dementsprechend wird das Spektrum – sofern alle Zähne eine identische Geometrie aufweisen und keine Rund- und Planlaufabweichungen vorliegen – nur aus Ordnungen der Zähnezahl und deren Vielfachen bestehen.

Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 2: Ein Zahnrad hat 15 identische Zähne und weist keine Rund- oder Planlaufabweichungen auf. Das Ordnungsspektrum zeigt folglich die 15-te Ordnung und deren Vielfache. Die Amplitude dieser Ordnungen hängt nur vom Verlauf der Drehwegabweichung ab.

Ein Aspekt, der in den Betrachtungen bislang ausgelassen wurde, ist die Oberflächenbeschaffenheit der Zahnflanken. Wie wirken sich unterschiedliche Rauheits-Kennwerte auf das Ordnungsspektrum aus? Ohne in die eher philosophische Fragestellung einzutauchen, ob Rauheit als geometrische Änderung der Zahnflanke oder als reine Oberflächenbeschaffenheit zu deuten ist, zeigt sich Rauheit in einem leicht veränderten Verhalten des Zahnkontakts und damit in einer anderen Drehwegabweichung.

Diesen Effekt visualisiert Abbildung 3: Die Amplituden der ursprünglichen höherharmonischen Ordnungen sind etwas kleiner geworden und dafür weist das Ordnungsspektrum sogenannte Geisterordnungen auf. Geisterordnungen sind definitionsgemäß Ordnungen, die nicht

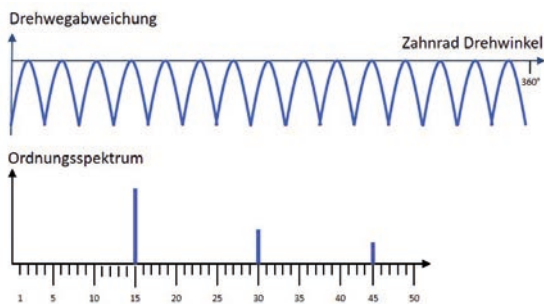


Abb. 2: Drehwegabweichung und Ordnungsspektrum bei identischen Zähnen

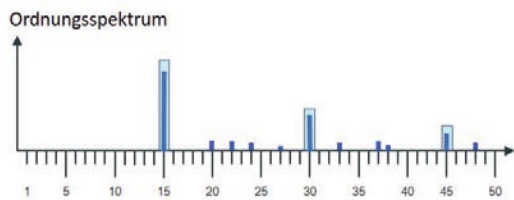


Abb. 3: Ordnungsspektrum mit Geisterordnungen

### Rauheit nach Maß: QSS – Quiet Surface Shifting

Bislang liegt bzw. lag die Zahngeometrie im Fokus der Betrachtungen: Simulationsprogramme sagen voraus, wie genau die Drehbewegung von einem Rad auf das andere übertragen wird. Obwohl es für



ganzzahlig durch die Zähnezahl teilbar sind. Die Energie, die vorher ausschließlich in den Höherharmonischen steckte, wird nun auf mehrere Ordnungen verteilt. Deswegen ändert sich das Geräuschempfinden. Denn die Wahrnehmung der Höherharmonischen wird durch die Geisterordnungen beeinflusst. Dieser Effekt zeigt sich in besseren psychoakustischen Kennwerten der Schärfe und der Tonalität.

Wie lässt sich nun eine stochastische Änderung der Rauheitskennwerte auf den Zahnflanken erreichen? Die Antwort darauf liegt im Abrichtprozess. Die Rauheit der Zahnflanken ist durch die Eigenschaften der Schleifschnecke gegeben, die sich durch den Abrichtprozess beeinflussen lässt: Ändert man das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen der Abrichtrolle und der Schleifschnecke, dann lassen sich darüber die Eigenschaften entlang der axialen Ausdehnung der Schleifschnecke modulieren.

Bei den Speed Viper Maschinen wurde die Variation der Geschwindigkeitsverhältnisse von Abrichtrolle und Schleifschnecke nicht durch eine reine Modulation der Abrichtrolldrehzahl realisiert, sondern über die Modulation der Shiftgeschwindigkeit. Natürlich muss dann für die korrekte Form der Schleifschnecke ihr Drehwinkel in Abhängigkeit von der Shiftposition nachgeführt werden. Dadurch lässt sich zunächst die gewünschte Modulation der Schleifschneckeneigenschaften erreichen. Die feste kinematische Kopplung zwischen der Shiftposition und der Drehwinkelposition der Schleifschnecke wird in der Steuerung der Maschine realisiert. Die Genauigkeit dieser Kopplung ist immer begrenzt. Das mag jetzt auf den ersten Blick nachteilig erscheinen – es entpuppt sich bei genauerer Betrachtung aber als weiterer Vorteil dieses Verfahrens. Denn: Durch kleinste Ungenauigkeiten in der Kopplung entstehen winzige geometrische

Fehler, die sich entlang der Schleifschnecke verteilen. Dies führt dazu, dass jeder Zahn ein klein wenig anders aussieht und somit die Zahneingriffe nicht mehr absolut identisch sind. Entsprechend wird die Drehwegabweichung winzig kleinen Schwankungen unterliegen. Das hat einen positiven Effekt auf das Geräuschempfinden.

Das Ergebnis verdeutlicht Abbildung 4: Durch die kleinen geometrischen Ungenauigkeiten entstehen Seitenbänder zu den höherharmonischen Ordnungen. Es treten auch Ordnungen unterhalb der ersten Zahneingriffsordnung auf, wie sie sonst aus Rund- und Planlaufabweichungen herrühren. Die psychoakustischen Kennwerte Schärfe und Tonalität nehmen ab. Klingelberg hat diesem Verfahren den Namen QSS – Quiet Surface Shifting – gegeben. Die rein physikalischen Schallfeldgrößen ändern sich nur unwesentlich, trotzdem wird die menschliche Empfindung des Schalls deutlich angenehmer. Die erzeugten Ungenauigkeiten sind beim QSS jedoch keine Zufallsergebnisse, sondern gezielt anwendbare Maßnahmen zur Verbesserung des Geräuschempfindens.

## Adaptives Shiften: So hält Werkzeug länger

Die dritte hier vorgestellte Spezialität des Wälzschleifens von Klingelberg zielt auf die Reduzierung der Werkzeugkosten ab. Üblicherweise wird die Shiftstrategie so ausgelegt, dass die Prozesssicherheit des Schleifens bei kleinstem Schleifscheibendurchmesser sichergestellt ist. Die-

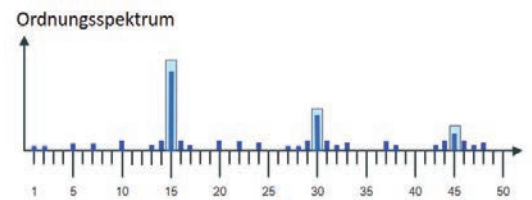


Abb. 4: Ordnungsspektrum bei modulierter Rauheit und minimal unterschiedlichen Flankentopographien

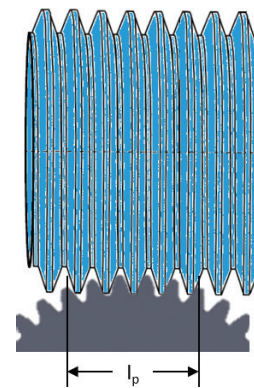


Abb. 5 a: Profilbildungszone auf der Schleifschnecke

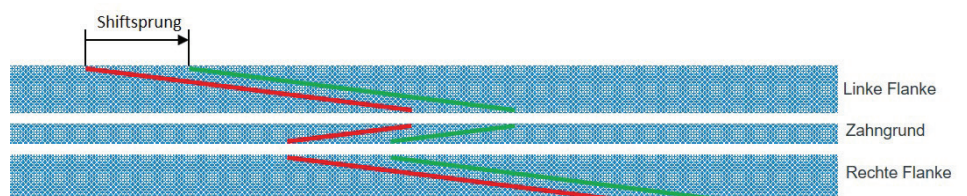


Abb. 5 b: Aktive Schleifkörner und Shiftsprung

# Mit dem Wechsel der Shiftstrategie auf adaptives Shiften lassen sich Werkzeugkosten um mehr als 18 Prozent senken.

## Kompakt

### Adaptives Shiften

Die Idee des adaptiven Shiftens verändert das Shiftverhältnis und den Shiftsprung so, dass unabhängig vom Schleifscheibendurchmesser stets gleiche technologische Kennwerte gegeben sind. Als maßgeblichen Kennwert hat Klingelnberg die Eingriffsdichte eingeführt. (Siehe Formel rechts.)

se fixe Shiftstrategie wird auch für eine neue unverbrauchte Schleifschnecke angewandt. Die Abbildungen 5 a und 5 b zeigen die Verhältnisse an einer eingängigen Schleifschnecke. Beim Shiften unterscheidet man zwischen Shiftverhältnis und Shiftsprung. Während beim Shiftsprung die Schleifschnecke vor dem nächsten Bauteil axial um einen gewissen Betrag verschoben wird, verschiebt man die Schleifschnecke beim Shiftverhältnis kontinuierlich mit jeder Umdrehung des Werkstückes.

Die axiale Länge  $l_p$  des profilgebenden Bereichs der Schleifschnecke ist unabhängig vom Durchmesser, jedoch nicht deren Länge der Abwicklung. Die rot eingezeichneten Linien (siehe Abbildung 5 b) verdeutlichen, welche Schleifkörner bei der Bearbeitung eines Zahnrads wirksam sind. Ein größeres Shiftverhältnis zeigt sich in der Darstellung der Abwicklung in einer größeren Länge und flacheren Neigung der Linien. Beim Shiftsprung sind die Linien zweier aufeinanderfolgend geschliffener Zahnräder parallel zueinander verschoben.

Die Idee des adaptiven Shiftens verändert das Shiftverhältnis und den Shiftsprung so, dass stets gleiche technologische Kennwerte gegeben sind. Als maßgeblichen Kennwert hat Klingelnberg die Eingriffsdichte eingeführt. Das Prinzip des adaptiven Shiftens lässt sich gut am Beispiel des Shiftverhältnisses erläutern: Das Shiftverhältnis  $s_v$  ist der Shiftweg pro Werkstückumdrehung. Das Shiftverhältnis

nis  $s_v$  wird zunächst in einen Shiftweg  $s_w$  pro Werkzeugumdrehung umgerechnet. Daraus lässt sich der Schraubweg pro Werkzeugumdrehung bestimmen. Die Eingriffsdichte ist dann der Kehrwert des Schraubweges pro Werkzeugumdrehung.

Shiftweg:  $s_w = s_v \cdot \frac{g}{z}$

Steigungswinkel:  $\tan(h) = 2 \cdot \frac{\pi \cdot m}{D}$

Schraubweg:  $\frac{s_w}{\sin(h)}$

Eingriffsdichte:  $d = \frac{\sin(h)}{s_w}$

$s_v$  Shiftverhältnis  
 $g$  Gangzahl der Schleifschnecke  
 $z$  Zähnezahzahl Werkstück  
 $m$  Modul  
 $D$  Außendurchmesser Schleifschnecke

Die Eingriffsdichte  $d$  zeigt also an, wie hoch die Belastung der Schleifkörner auf einem Millimeter Flankenlänge der Schleifschnecke ist. Beim adaptiven Shiften setzt man eine konstante Eingriffsdichte  $d$  voraus. Für das erprobte Shiftverhältnis  $s_v$  bei kleinstem Schleifschneckendurchmesser  $D_{min}$  wird die Eingriffsdichte  $d$  berechnet. Für die gegebene Eingriffsdichte  $d$  berechnet man dann aus angegebenen Formeln das Shiftverhältnis  $s_v(D)$ .

Was lässt sich damit genau erreichen? Inwiefern sich die Einsatzdauer der Schleifschnecke konkret verbessert, zeigt ein Beispiel (siehe Tabelle 1): Hat man bisher immer nach 80 Teilen bei einem Shiftverhältnis  $s_v = 0,3$  die Schleifschnecke abgerichtet, so kann für die Schleifschnecke mit maximalem Durchmesser ein Shiftverhältnis  $s_v = 0,205$  bei konstanter Eingriffsdichte verwendet werden. Dieses

### DIE FILME ZUR ...



... Speed Viper mit Doppelspindel-Konzept



... Speed Viper

neue Shiftverhältnis erhöht die Anzahl der Teile, nach denen ein Abrichtprozess erfolgen muss, im Verhältnis der jeweiligen Shiftverhältnisse von 80 auf 117. Mit dem Mittelwert von 98 für die gesamte Einsatzdauer der Schleifschnecke verbessert sich die Anzahl der Teile, die mit einer Schleifscheibe geschliffen werden können.

Setzt man einen radialen Abrichtbetrag von 0,25 mm an, so lässt sich die Schleifschnecke in diesem Beispiel insgesamt 196 mal abrichten. Mit dem adaptiven Shiften sinken die Werkzeugkosten also um über 18 Prozent (siehe Tabelle 2). Dabei geht man keinerlei technologische Risiken ein. Zusätzlich reduziert sich im Mittel die Bearbeitungszeit, da die Abrichtfrequenz zu Beginn wesentlich niedriger ist.

### Drei Pluspunkte von vielen

Die drei hier vorgestellten Besonderheiten des Speed Viper Konzepts bieten mit Blick auf die eingangs erwähnten Herausforderungen – höchstmögliche Produktivität, sichere Prozesse und leichte Bedienbarkeit – größtmögliche Unterstützung im Produktionsalltag. Sämtliche Features der Speed Viper Familie sind darauf ausgerichtet, hochproduktives Wälzschleifen in der Serie in einem Umfeld von Industrie 4.0 gerade unter dem Blickwinkel der Wirtschaftlichkeit zu realisieren. ◆

Verzahnungsbeispiel		
Zähnezahl	z	29
Zahnbreite [mm]	b	40
Modul [mm]	m	2,5
Gangzahl der Schleifschnecke	g	5
kleinster Schleifschneckendurchmesser [mm]	Dmin	210
größter Schleifschneckendurchmesser [mm]	Dmax	308
Shiftverhältnis [mm/Werkstückumdrehung]	sv(Dmin)	0,3
Anzahl Teile vor Abrichten		80
Eingriffsdichte	d(Dmin)	1,441
Shiftverhältnis [mm/Werkstückumdrehung]	sv(Dmax)	0,205

Tabelle 1: Beispielhafte Berechnung der Einsatzdauer einer Schleifschnecke

	konstantes Shiften	adaptives Shiften
Schleifscheibendurchmesser 210 mm	$s_v = 0,300$ mm	$s_v = 0,300$ mm
Schleifscheibendurchmesser 308 mm	$s_v = 0,300$ mm	$s_v = 0,205$ mm
radialer Abrichtbetrag	0,25 mm	
Anzahl Teile vor Abrichten	80	117 ... 80
Anzahl Teile pro Schleifscheibe	15.680	19.208
<b>Werkzeugstandlänge</b>	<b>100 %</b>	<b>122,5 %</b>

Tabelle 2: Konstantes versus adaptives Shiften



Dr.-Ing. Hartmuth Müller

Head of Technology & Innovation,  
KLINGELNBERG GmbH