

# HEISSE LÖSUNGEN FÜR EINEN KÜHLEN PLANETEN

Die weltweite Nachfrage nach Windkraftgetrieben wird sich nach Schätzungen von Experten bis zum Ende des Jahrzehnts vervierfachen. Hersteller suchen daher nach Technologien, um ihre Produktion zu erweitern. Gefragt sind Getriebe, die über Jahre unter schwierigen Bedingungen durchhalten. » VON DR. ANTOINE TÜRICH, GOTTFRIED KLEIN UND HANSPETER DINNER

**2**023 war das heißeste Jahr auf unserem Planeten seit Beginn der Aufzeichnungen, und das neue Hitzebewusstsein macht sich in der Windenergiebranche deutlich bemerkbar. Nach Schätzungen des Global Wind Energy Council (GWEC) muss sich die Installationsrate von Windkraftanlagen bis zum Ende des Jahrzehnts weltweit vervierfachen, will man das von der Internationalen Organisation für erneuerbare Energien (IRENA) gesteckte Ziel der Kohlenstoff-Netto-Null bis 2050 erreichen und einen Anstieg der weltweiten durchschnittlichen Jahrestemperatur um mehr als die prognostizierten 1,5 Grad Celcius verhindern. Erfreulicherweise ist zumindest bei den Selbstverpflichtungen zur Netto-Null eine zunehmende Dynamik zu verzeichnen und die weltweit produzierte Leistung aus Windkraftanlagen hat bereits zum Ende des Jahres 2023 den historischen Rekordwert von 1 TW erreicht. Dadurch werden jährlich rund 1,2 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart, was in etwa der Menge des gesamten Kohlenstoffausstoßes Südamerikas entspricht.

## Qualität der Bauteile ist entscheidend

Es herrscht Aufwind bei den Herstellern von Windkraftgetrieben, die einer nie da gewesenen Nachfrage gegenüberstehen und deren

Auftragsbestände bis weit in die Zukunft reichen. Dabei haben sie aber auch mit Gegenwind zu kämpfen: Die Notwendigkeit, Kapazitätsengpässe zu bewältigen und zugleich Anlagen mit höherem Wirkungsgrad und extremer Zuverlässigkeit zu produzieren, stellt die Hersteller vor große Herausforderungen. Die durchschnittliche Lebensdauer eines Windkraftgetriebes beträgt 20 Jahre - Abnutzung und Verschleiß fordern ihren Tribut und machen Reparaturen und Wartungsarbeiten aufwendig und teuer. Die Qualität der Bauteile ist daher entscheidend.

Gleason nimmt diese Herausforderung an und bietet – neben Auslegungssoftware – eine ganze Reihe von Lösungen zur Produktionsoptimierung an, die auf die am häufigsten verbauten Zahnradtypen in modernen Windkraftgetrieben, insbesondere Planetenräder im Durchmesserbereich bis 1.200 mm, abzielen.

## Auf die Auslegung kommt es an

Die Auslegung einer Verzahnung für das Hauptgetriebe einer Hochleistungs-Windkraftanlage bringt eigene Herausforderungen mit sich. Die Anlagen von heute sind viel größer als ihre Vorgänger und produzieren deutlich mehr Leistung. Manche sind so hoch wie der Eiffelturm und generieren bis zu 15 MW, ein Vielfaches der Leistung einer

durchschnittlichen Windkraftanlage im Jahr 2010. Die Getriebedesigns haben mit der Entwicklung Schritt gehalten: So gibt es mittlerweile viele zusätzliche Varianten für Anwendungen mit niedriger, mittlerer und hoher Drehzahl sowie Varianten mit einer, zwei, drei oder vier Stufen. Die zunehmende Komplexität und der hohe Anspruch, mehr Leistung effizienter zu generieren und zugleich eine größere Zuverlässigkeit zu erzielen, haben es erforderlich gemacht, dass die Zahnradaddesign zuerst optimiert und ihre Herstellbarkeit sichergestellt wird, lange bevor das erste Zahnrad gefertigt wird. Genau dafür gibt es Kisssoft, ein modulares Berechnungsprogramm zur Auslegung, Optimierung und Nachrechnung von Maschinenelementen. Sein Anwendungsbereich reicht von Berechnungen einzelner Komponenten bis hin zur Auslegung kompletter Getriebe mit dem Systemmodul Kisssys. Gerade in Anbetracht der Herausforderungen und der Ansprüche, mit denen Konstrukteure bei der Auslegung eines Getriebes für eine Windkraftanlage konfrontiert sind, ist Kisssoft ein entscheidendes Werkzeug für einen erfolgreichen Designprozess.

## Geringere Ausfallwahrscheinlichkeit

In der langsamen Stufe (LSS) birgt die extrem niedrige Drehzahl bei hohem Dreh-

Die Nachfrage nach Windkraftgetrieben wird weiter steigen, lautet die Prognose.

Bild: Photocreo Bednarek/stock.adobe.com

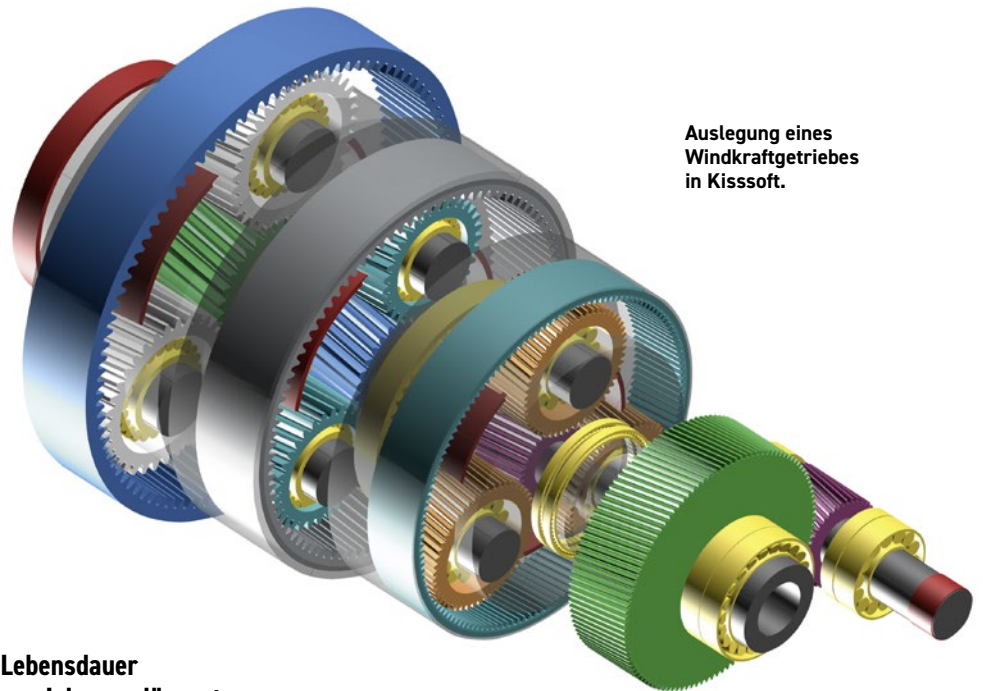


moment ein Risiko für Graufleckigkeit und Flankenbruch sowie eine ungleichmäßige Lastverteilung und Flanken- und Fußversagen. Während letztgenannte Beispiele einfach zu handhaben sind und in den Gestaltungsrichtlinien, z. B. IEC 61400-4, detailliert behandelt werden, sind Bewertungsverfahren für Graufleckigkeit und Flankenbruch gemäß Normenreihe ISO 6336 immer noch mit einer gewissen Ambiguität verbunden. Ausfälle im Feld korrelieren nicht immer mit der technischen Analyse. Die Einflüsse von Werkstoffzusammensetzung und -reinheit, Wärmebehandlung, Eigenspannungen und Kugelstrahlen sind in der LSS aufgrund der großen Teilegröße signifikant. Solche Einflüsse sind bei der Auslegung eines Getriebes allerdings schwer zu quantifizieren, wobei gerade der Designprozess der LSS die größte Kostenbelastung nach sich zieht. Das Berechnungsprogramm KISSsoft kann im Designprozess unterstützen, indem es hunderte oder gar tausende Auslegungsvorschläge macht, aus denen der erfahrene Konstrukteur die geeignete Lösung wählen kann. Hierbei werden Eigenschaften berücksichtigt wie die absolute Größe des Hohlrads, die Drehmomentdichte, die Schwingungserzeugung, die erforderliche Einhärtetiefe und anderes mehr. Da das Antriebsmoment in mehrere Leistungspfade aufgeteilt werden muss, sind in der LSS anstelle von nur drei Planeten vier, fünf oder mehr Planeten erforderlich. Eine auf einer Simulationsberechnung basierende Schätzung der Lastaufteilung zwischen den Planeten lässt sich leicht erstellen, begleitend zu einer experimentellen Verifizierung derselben.

### Besserer Wirkungsgrad dank Optimierung

In der mittleren Stufe (ISS) ist die Feinauslegung der Getriebeübersetzung das wichtigste Ziel. Zudem muss das Drehmoment weiter gesenkt werden, damit es von der schnellen Stufe bewältigt werden kann. Eine relativ hohe Übersetzung erfordert eine relativ geringe Zähnezahl am Sonnenrad, während das Pitchrohr den minimalen Durchmesser definiert. Des Weiteren machen die höheren Umfangsgeschwindigkeiten eine höhere Überdeckung nötig, um das Risiko erhöhter Vibrationen zu mindern. Bei evolventischen Zahnradern erfordert eine hohe Profilüberdeckung zudem eine entsprechend hohe Zähnezahl. Auch hier sind die Anforderungen widersprüchlich und es müssen in kürzester Zeit Algorithmen zur Variation mehrerer Parameter (Zahnbrei-

te, Schrägungswinkel, Profilverchiebung, Zahnprofil, Fußrundung, Protuberanz, Zugabe für Fertigbearbeitung usw.) berechnet werden. Die Größe des Planetenrads muss so gewählt werden, dass Wälzlager mit Ringen Platz finden und zugleich sichergestellt wird, dass genügend Raum unter dem Fußkreisdurchmesser bleibt. Technologien wie integrierte Laufbahnen oder hydrodynamische Gleitlager bringen sowohl Einschränkungen als auch Freiheiten bei der Auslegung des Planetengetriebes mit sich.



Auslegung eines Windkraftgetriebes in KISSsoft.

### Lebensdauer um Jahre verlängert

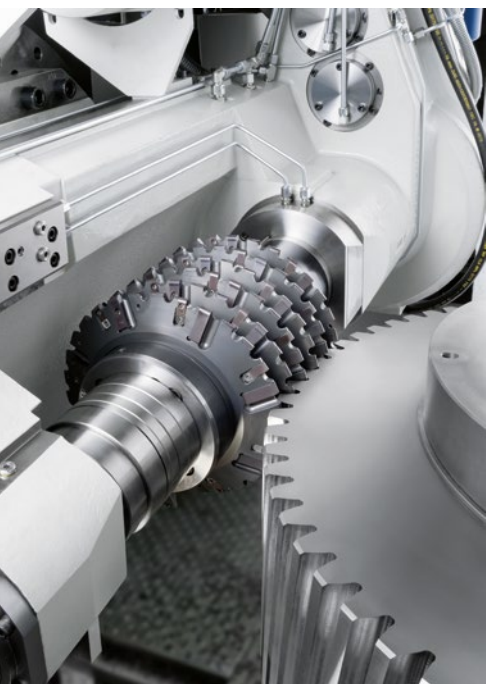
Die schnelle Stufe (HSS) schließlich erreicht hohe Zykluszahlen bis weit in den Ermüdungsbereich hinein, wo experimentelle S-N-Kurven schwer zu ermitteln sind. Die Zahnradbewertung für eine quasi unbegrenzte Lebensdauer hängt stark von der Werkstoffreinheit, der Qualitätskontrolle und der Schmierung ab. Bei der Auslegung der Verzahnung ist die „Grübchenbildung“ als häufigster Ausfallmodus zu berücksichtigen, wobei hierfür die zuvor genannten Parameter bei den Lebensdauerberechnungen weitgehend miteinbezogen werden. Softwaregestützte Berechnungen von Lebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit beruhen in der Regel auf Lastdauerverteilungs-Kollektiven, können heutzutage aber auch direkt auf gemessenen Drehmomentdaten über Zeit basieren. Die Auswirkungen der Drehmomentumkehr können bei der Berechnung der Flanken- und Fußmodifikationen nach der Schadensakkumulationsmethode berücksichtigt werden, zum Beispiel sollte hierfür die Verwendung der „Haibach-Modifikation“ erwogen werden.

Die Zahnkontaktanalyse unter Last sowie die Bestimmung der Drehwegabweichung in der HSS und ihres Spektrums sind des Weiteren wesentliche Bestandteile der Verzahnungsauslegung. Ziel dabei sind geringe Eingriffskraftamplituden und ausgeprägte Höhere Ordnungen im Amplitudenspektrum. Hierfür stellt KISSsoft Konstrukteuren potente Werkzeuge zur Verfügung, damit der komplexe Designprozess beschleunigt und optimiert werden kann.

### Einen Zahn zugelegt

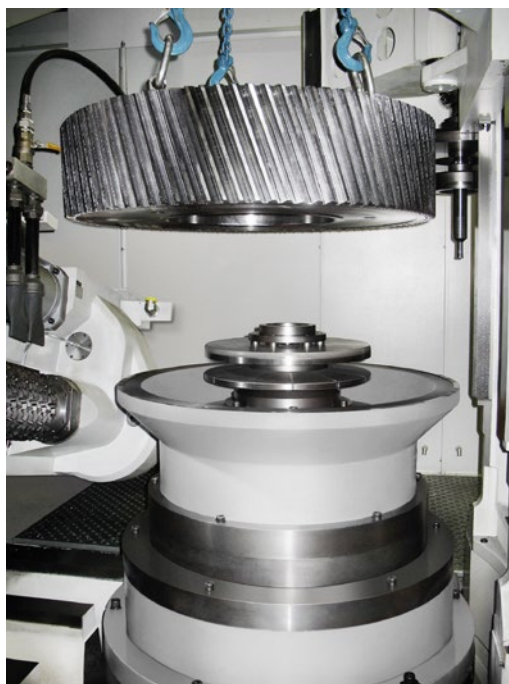
Signifikante Zeitersparnisse und Qualitätsverbesserungen sind aber auch in der Produktion der Windkraftzahnräder möglich: Mit den Allzweck-Wälzfräsmaschinen der Baureihen P und Titan von Gleason wird maximale Produktivität mit höchster Präzision vereint. Für die Planetenräder werden idealerweise Wälzfräsmaschinen für Werkstückdurchmesser bis 1.200 mm, mit oder ohne Automation, eingesetzt. Diese Maschinen werden auch zur Produktion der Sonnenradwellen verwendet. Für die größeren Hohlräder werden Wälzfräsmaschinen mit bis zu vier Meter Werkstückdurchmesser und leistungsstarken Innenfräsköpfen für das Profilverfräsen benötigt. All diese Maschinen müssen sowohl beim Schrupp- als auch beim Schichtfräsen maximale Produktivität bieten.

Die Wälzfräsmaschinen der Gleason P-Serie sind auf die Anforderungen der Windkraftzahnräder zugeschnitten. Breite Führungsbahnen mit hydraulisch vorgespannten Führungen kommen in Verbindung mit einer separaten Linearführung und einer



**Opti-Cut-Fräser (und Zahnformfräser) maximieren Materialabtragsraten und Schnittgeschwindigkeiten mittels indexierbarer Hartmetalleinsätze.**

spielfreien Montage der Rollenlager zum Einsatz, um präzise, wiederholbare Bewegungen bei jeder Vorschubgeschwindigkeit zu gewährleisten. Das gespannte Doppelschneckenradgetriebe sorgt für Spielfreiheit und gewährleistet in Kombination mit den hydrostatischen Lagern höchste Teilgenauigkeit und maximale Präzision von Axial- und Rundlauf für den Werkstücktisch. Mit der Titan-Serie von Gleason ist nun ein ausgeklügeltes Maschinenkonzept für das hocheffiziente Fräsen von außenverzahnten Planeten- und Sonnenrädern in Windkraftgetrieben verfügbar. Patentierte Führungsbahnen gewährleisten eine hohe Leistung sowohl beim Trocken- als auch beim Nassfräsen. Die Führungsbahnen, eine Kombination aus Gleit- und Wälzführung, bieten eine ideale Verbindung aus Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften, um eine markant gesteigerte Produktivität und eine verbesserte Zahnrad-Schnittqualität zu gewährleisten. Direkt angetriebene Tische mit hydrostatischen Lagern bieten Leistung auf neuem Niveau. Mit beiden Maschinenserien werden mehrere Fräskopfvarianten für außen- und innenverzahnte Zahnräder sowie Hohlräder angeboten. Je nach Modul- und Zahnradgröße können HSS-Vollhartmetallfräser oder spezifische Opti-Cut-Fräser (und Zahnformfräser) mit Hartmetalleinsätzen verwendet werden. Das Opti-Cut-Design garantiert maximale Materialabtragsraten



**Das Spannsystem X-Pandisk ist für Werkstücke mit bis zu 2.000 kg Gewicht geeignet und kann diese automatisch zentrieren und spannen.**

und Schnittgeschwindigkeiten mittels indexierbarer Hartmetalleinsätze. Da das Werkzeug nicht mehr nachgeschliffen werden muss, erzielen Opti-Cut-Fräser eine konsistente Werkzeugstandzeit und ersparen das zeitintensive Nachschleifen gebrauchter Werkzeuge sowie das Handling zusätzlicher Ersatzfräser. Opti-Cut-Fräser sind in einer Vielzahl verschiedener Fräsergrößen und -geometrien zum Fräsen und Wälzfräsen von Verzahnungen verfügbar.

### Unproduktive Zeiten reduzieren

Angesichts der hohen Anforderungen an das Produktionsvolumen von Planetenrädern ist die Reduktion unproduktiver Be- und Entlade- sowie Werkstückspannzeiten von wesentlicher Bedeutung. Gleason bietet eine Reihe flexibler Automations- und Werkstückspannlösungen, die alle ineinandergreifen, um unproduktive Zeiten erheblich zu reduzieren. So können zum Beispiel mit dem Spannsystem X-Pandisk Werkstücke mit bis zu 2.000 Kilogramm Gewicht automatisch zentriert und gespannt werden. Dadurch wird das typische Verfahren zur manuellen Einstellung und Ausrichtung von Werkstücken dieser Größe erheblich verkürzt.

Nullpunktspannsysteme sind für größere Werkstücke mit einem Gewicht von bis zu 8.000 Kilogramm inklusive Palette vorgesehen. Hierbei erfolgt die Einstellung der Spannvorrichtungen und der Werkstücke

parallel während der Bearbeitung. So lässt sich mit minimalen Einstellzeiten die optimale Qualität erzielen.

Zusammen mit diesen Werkstückspannlösungen kann auch das parallele Be- und Entladen während der Bearbeitung zur weiteren Reduzierung der unproduktiven Zeit beitragen. Dazu kommen Automationslösungen zum Einsatz, die jetzt auch für die größeren Wälzfräsmaschinen erhältlich sind. Dazu zählen Palettenwechslersysteme und Zweistationen-Ringlader für Scheibenteile.

### Neue Profilschleiflösungen lösen Produktionszwickmühle

Da die Qualitätsanforderungen mittlerweile so hoch sind, wie es für Zahnräder dieser Größe nur selten der Fall ist, ist eine hochpräzise Hartfeinbearbeitung unerlässlich. Wie aber lässt sich die Hartfeinbearbeitung am besten durchführen, ohne eine teure Engstelle in der Produktion zu erzeugen und dabei die Kosten in die Höhe zu treiben? Bei Gleason wurde diese „Produktionszwickmühle“ mit mehreren neuen Profilschleiflösungen angegangen.

→ **Profilschleifmaschine 1200G:** Mit 1.300 mm axialem Verfahrensweg deckt die neue 1200G die gängigsten Anwendungen in diesem Größenbereich ab. Für die großen

**Die Axialgeschwindigkeit der neuen 1200G beträgt bis zu 14,5 m/min.**



Profiltiefen und die damit verbundene hohe Schleifleistung, die bei Windkraft-Anwendungen erforderlich sind, ist ein Hochleistungsschleifkopf mit starken 150 Nm Drehmoment und einem maximalen Schleifscheibendurchmesser von 450 mm erhältlich. Dieser Hochleistungsschleifkopf ist für Profiltiefen von bis zu 80 mm geeignet und adressiert alle Zahnräder der gängigen Windkraftgetriebe. Die Axialgeschwindigkeit der 1200G, die besonders wichtig ist, um kurze Schleifzeiten zu gewährleisten, beträgt 10 m/min und übertrifft die Leistung von vergleichbaren Maschinen um bis zu 66 %. Optional sind sogar Axialgeschwindigkeiten von bis zu 14,5 m/min möglich, womit in dieser Kategorie ein neuer Maßstab gesetzt wird.

Die Ausführung des direkt angetriebenen Werkstücktisches erlaubt eine hohe Dynamik und ermöglicht durch den Einsatz von Gleasons proprietärem Auto Servo Tuning (AST) die Handhabung von Werkstücken einer Vielzahl von Größen, Gewichten und Maßentragheiten.

Zu guter Letzt verfügt die 1200G über eine integrierte Messeinrichtung zum Prüfen außenverzahnter Zahnräder und Hohlräder direkt in der Maschine, was im Vergleich zum Messen dieser Teile im Messraum, inklusive des notwendigen Transports, wertvolle Zeit

einspart. Die Auswertung der Messdaten erfolgt nach allen gängigen Industrienormen.

→ **Profilschleifmaschine Titan:** Die Schleifmaschinen der Titan-Serie bieten die ideale Kombination aus Hochleistungsschleifen und Oberflächenbearbeitung der Spitzenklasse. Durch den Einsatz des einzigartigen Werkzeugwechslers müssen keine Kompromisse mehr bei der Wahl einer geeigneten Schleifscheibenspezifikation für das Schruppen und Schlichten eingegangen werden. Stattdessen können individuelle Schleifscheibenspezifikationen verwendet werden, die speziell an die Aufgaben des Schruppen und Schlichtens angepasst sind. Das hat eine höhere Produktivität, eine bessere Oberflächenbearbeitung und zugleich eine höhere Verfahrenszuverlässigkeit zum Ergebnis.

Das modulare Design der Titan-Serie deckt mit den Maschinenmodellen Titan 1200G und Titan 1600G Werkstückdurchmesser bis zu 1.600 mm, einem axialen Verfahrweg von bis zu 100 mm ab. Für das Profilschleifen von Zahnrädern für Windkraftgetriebe für größere Durchmesser von bis zu 4.000 mm bietet Gleason die P-Serie an. So ist etwa die P4000G besonders gut für die Hartfeinbearbeitung größerer Hohlräder geeignet.

### Zykluszeiten verkürzen

Mit all diesen Serien erhalten Produzenten von Windkraftgetrieben eine Auswahl an unterschiedlichen Schleifköpfen für das Schleifen von Innen- und Außenverzahnungen, um sämtliche Produktionsanforderungen abzudecken. Darüber hinaus sind sowohl die 1200G als auch die Titan 1200G dazu konzipiert, Zykluszeiten um wertvolle Minuten und gar Stunden zu verkürzen, indem typische unproduktive Zeiten drastisch reduziert werden. Zum Beispiel:

→ **Kompensation von Taumel- und Rundlaufabweichung:** Das zeitintensive manuelle Ausrichten von großen und schweren Werkstücken auf dem Maschinentisch lässt sich mithilfe der patentierten Kompensation von Taumel- und Rundlaufabweichung erheblich verkürzen. Ein Messfühler erkennt die Exzentrizitätsposition des verspannten Werkstücks auf einer oder zwei Messebenen und kompensiert während des Schleifens sowohl das Taumeln als auch die Rundlaufabweichung des Werkstücks. Diese Funktion gewährleistet hohe Präzision bei signifikant verkürzter Ladezeit.

→ **Aufmaßspezifisches Schleifen** vermeidet durch mögliche Härteverwerfungen



**Neue Profilschleiflösungen sind von zentraler Bedeutung, um die für heutige Windkraftgetriebe erwartete Qualität und Zuverlässigkeit zu erzielen und zugleich die Zykluszeiten zu verringern.**  
 Bilder: Gleason Corporation

verursachtes Luftschleifen, insbesondere während der ersten Schleifumläufe. Während des Zentrierens der Zähne mittels Messtaster wird die Aufmaßverteilung über den Umfang des Zahnrads ermittelt. Das Schleifen erfolgt nur dort, wo ein Werkstoffabtrag notwendig ist.

→ **A(X) und degressive Zustellverfahren:** Innovative Zustellverfahren wie das patentierte A(X) und Degressive Zustellverfahren haben einen signifikant wirksameren, gleichmäßigen Werkstoffabtrag entlang des gesamten Profils während aller Schleifumläufe zum Ergebnis. Das Resultat sind kürzere Schleifzeiten, ein verbessertes Verschleißverhalten der Schleifscheibe und eine höhere Verfahrenszuverlässigkeit, um Schleifbrand zu vermeiden.

→ **Smart Dressing:** Das teure, zeitintensive Grundabrichten zum Erst- oder Umprofilieren einer Schleifscheibe wird durch den Einsatz von „Smart Dressing“ drastisch verkürzt. Diese innovative Softwarefunktion sorgt dafür, dass das Abrichten der Schleifscheibe nur in Bereichen erfolgt, in denen es erforderlich ist. **« KF**

**Dr. Antoine Türich** ist Direktor Produktmanagement Hartfeinbearbeitung bei Gleason.

**Gottfried Klein** ist Direktor Produktmanagement Weichbearbeitung bei der Gleason Corporation.

**Hanspeter Dinner** ist stellvertretender Geschäftsführer bei der KISSsoft AG.

