

Bild 1: Nockenwelle

Scania

## Fortschrittliche Technologie zum Schleifen von Nockenwellen

Autoren:

Dr. Jeffrey Badger, The Grinding Doc, New York, NY, USA; Prof. Peter Krajnik, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden; Dr. Radovan Dražumerič, Universität Ljubljana, Slowenien; Richard Dogen, Scania CV AB, Södertälje, Schweden; Jonas Trepp, Scania CV AB, Södertälje, Schweden; Pontus Andreasson, Scania CV AB, Södertälje, Schweden; Dr. Anders Berglund, Scania CV AB, Södertälje, Schweden

Die ersten Automobilverbrennungsmotoren verwendeten eine Nockenwelle zum Öffnen und Schließen der Ventile. Heutzutage, mehr als ein Jahrhundert später, werden Nockenwellen immer noch für dieselbe Grundfunktion benutzt, auch wenn sich Geometrien, Materialien, Oberflächengüten und Toleranzen deutlich verändert haben, um einen geringeren Kraftstoffverbrauch, geringere Emissionen und ein höheres Drehmoment zu erreichen.

Dennoch stellt die Produktion von Nockenwellen immer noch große Herausforderungen an den Hersteller, insbesondere im Hinblick auf die Schleifbearbeitung. Die Werkstücktoleranzen wurden enger, die Oberflächenqualitäten höher und die Bauteile müssen nunmehr frei von jedweder thermischen Schädigung sein. Bisher arbeiteten Maschinenhersteller, Schleifscheibenhersteller, Forscher und Nockenwellenhersteller unabhängig voneinander – zum

Nachteil des Endprodukts. Vor kurzem wurden jedoch bedeutende Fortschritte durch eine Zusammenführung der genannten Gruppen und einer daraus resultierenden Bündelung der einzelnen Fachkompetenzen gemacht. Nockenwellen für Schwerlastdieselmotoren werden in der Regel aus gehärtetem Stahl hergestellt. Ihre Endbearbeitung erfolgt auf hochpräzisen, mehrere Millionen Euro teuren, CNC-Schleifmaschinen. Die Bearbeitung erfolgt

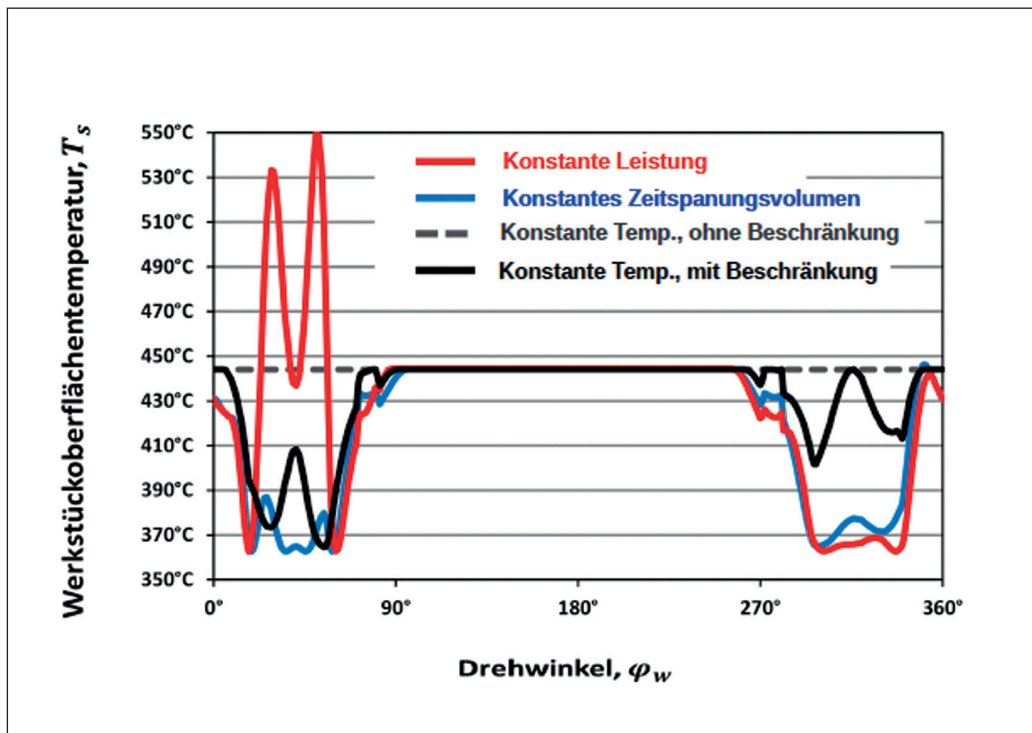


Bild 2:  
Geometrische Eingriffsverhältnisse beim Schleifen von Nockenwellen

durch kubisches Bornitrid (CBN), ein von Menschen hergestelltes Schleifmittel, das zum ersten Mal im Verlauf 1950er Jahre synthetisiert wurde und auf der Härteskala der Schleifmittel nur hinter dem Diamanten liegt. Eine der schwierigeren Herausforderungen ist, dass die Nockenwelle während des Schleifprozesses keinen sogenannten „Schleifbrand“ erlitten haben darf. Schleifbrand beschreibt eine in der Regel nachteilige Veränderung der Werkstückeigenschaften infolge zu hoher Schleiftemperaturen. Bei mäßig hohen Temperaturen wird das Werkstück angelassen und verliert infolgedessen seine Härte. Bei höheren Temperaturen entwickeln sich Zugeigenspannungen, die die Lebensdauer der Nockenwelle verringern. Und bei sehr hohen Temperaturen findet eine Phasenumwandlung im Gefüge des Nockenwellenwerkstoffs statt, die entweder sofort oder während des Einsatzes zu Rissbildung führen kann.

Das Schleifen von Nockenwellen ist eine der anspruchsvollsten Schleifoperationen. Dies liegt ins-

besondere in der komplexen Geometrie der Werkstücke begründet. Beim Außenrundeinstechschleifen, beispielsweise von Wellen, sind das Zeitspannungsvolumen und die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück annähernd konstant über die Eingriffszeit. Dies ermöglicht es Schleifprozessingenieuren genau vorherzusagen, was in der Schleifzone passiert und hohe Schleiftemperaturen zu vermeiden.

Im Gegensatz hierzu ist das Nockenwellenschleifen der Gruppe des „Unrundscheifens“ zuzuordnen. In diesem Fall führt das Werkstück während des Eingriffs eine oszillierende Bewegung durch, um die für Nockenwellen typische „Ei-Form“ zu generieren. Aufgrund dieser Geometrie verändert sich das Zeitspannungsvolumen während des Prozesses. Diese Schwankungen im Zeitspannungsvolumen führen zu verschiedenen Problemen. Zunächst steigt die Spandicke und somit auch die Belastung der Körner der Schleifscheibe mit jeder Steigerung der Zustellung. Die erhöhte Kornbelastung führt zu einem

schnelleren Schleifscheibenverschleiß. Neben einer Steigerung der Prozesszeit durch häufigeres Abrichten der Schleifscheibe werden beträchtliche Mengen der teuren CBN-Schleifscheiben verbraucht. Zweitens ändert sich während einer Werkstückumdrehung die Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück. Folglich ist die den Kontaktbereich beschreibende Mathematik sehr komplex. Drittens und am wichtigsten ist die durch den Anstieg des Zeitspannungsvolums erhöhte Wärmeerzeugung und folglich die erhöhte Schleiftemperatur, die zu Schleifbrand führen kann.

Um den Anstieg der Spandicke und die damit verbundenen negativen Folgen zu reduzieren, entwickelten Ingenieure und Maschinenhersteller vereint das Schleifen von Nockenwellen mit konstantem Zeitspannungsvolumen. Hierbei wird die Werkstückgeschwindigkeit (Umdrehungen pro Minute) während einer erhöhten Schleifscheibenbelastung gesenkt und während einer geringen Schleifscheibenbelastung erhöht.

Dies erfolgt durch die gezielte Beschleunigung und Verlangsamung des Werkstücks während einer Werkstückumdrehung.

Doch der Weg zum Schleifbrand ist mit guten Vorsätzen gepflastert, welche ihre eigene Reihe von Problemen verursachen. Zunächst nimmt die Spandicke infolge der verringerten Werkstückgeschwindigkeit ab. Eine kleinere Spandicke bewirkt, dass die CBN-Körner mehr über die Oberfläche reiben und weniger das Material zerspanen, was zu einer größeren Wärmeerzeugung führt. Auch bedeutet eine langsamere Werkstückgeschwindigkeit, dass ein Punkt des Werkstücks in der „Heißen Zone“ mehr Zeit verbringt. Auch dies verursacht höhere Temperaturen.

In anderen Worten, der Vorteil der Verringerung des Zeitspannungsvolumens im „kritischen Bereich“ führte zu einer erhöhten Kornreibung und einer größeren Aufenthaltszeit in der „Heißen Zone“. Dies minimierte die gewonnenen Vorteile und verschlechterte die Situation in einigen Fällen sogar. Im Hinblick auf eine bessere Kontrolle der Schleiftemperaturen war das Ergebnis im besten Fall zufriedenstellend allerdings mit dem Nachteil erhöhter Taktzeiten. Nach dem „konstantem Zeitspannungsvolumen“ kam die Idee der „kon-

stanten Leistung“. In diesem Fall wurde die Schleifscheibenspindel-leistung gemessen. Falls während des Prozesses ein vorher bestimmtes Niveau überschritten wurde, reduzierte sich die Werkstückdrehzahl erneut. Diese Methode wies jedoch die gleichen Nachteile wie die Methode des „konstanten Zeitspannungsvolumens“ auf.

Heutzutage werden beide genannten Methoden und die der konstanten Werkstückdrehzahl von Unternehmen verwendet. All jene gehen nach dem „Trial & Error“ Prinzip vor. Dabei wird ein Parametersatz bestehend aus Vorschüben und Zustellungen größtenteils zufällig gewählt. Anpassungen werden hauptsächlich nach Intuition und Gefühl des Maschinenbedieners vorgenommen. Anschließend erfolgt eine Laboruntersuchung des Werkstücks auf thermische Schäden. Wenn das Werkstück keine thermischen Schäden aufweist werden die verwendeten Parameter beibehalten. Falls dies nicht der Fall sein sollte wird der Prozess so lange optimiert bis das Werkstück keine thermischen Schädigungen mehr aufweist.

Das Jaeger Modell: Um Schleifbrand zu vermeiden, begannen Ingenieure in den 1970er Jahren das von Jaeger (1942) entwickelte Modell zu sich bewegenden Wärmequellen

# One cable control network

MODULAR

SCHNELLER DATENAUSTAUSCH

REDUZIERTER INSTALLATIONS-AUFWAND

FLEXIBEL

KOMPAKT

ROBUST

ERWEITERBAR

KURZE INSTALLATIONSZEIT

REDUZIERTE AUSFALLZEITEN

# BLÜ

Innovatives Steuer- und Überwachungssystem,  
welches das Konzept der vernetzten  
Werkzeugmaschine revolutioniert.



**MARPOSS**

[www.marposs.com](http://www.marposs.com)

Ihr globaler Partner für Fertigungsmesstechnik

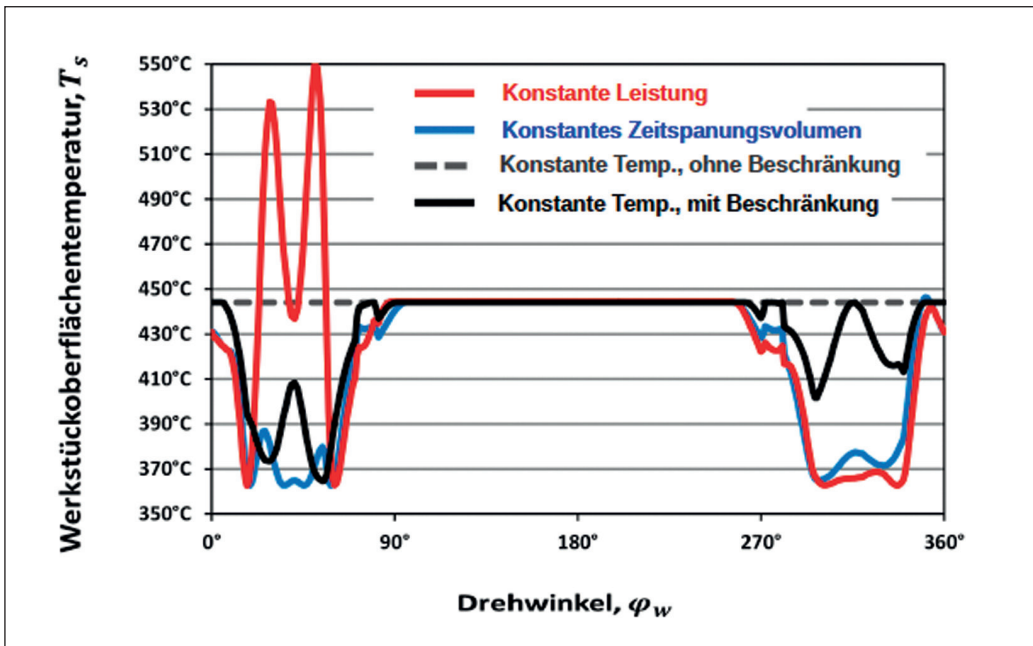


Bild 3: Prognostizierte Werkstückoberflächentemperatur bei der Methode mit konstantem Zeitspannungsvolumen, mit konstanter Leistung und mit konstanter Temperatur

zu nutzen, um die Wärme, die in das Werkstück geht, vorherzusagen. Die meisten arbeiteten mit der spezifischen Energie, die die erforderliche Energie zur Entfernung eines Kubikmillimeters des Werkstückmaterials beschreibt. Die spezifische Energie hängt von den durchschnittlichen Spandicken ab, eine größere Spandicke erzeugt weniger Reibung und damit eine geringere spezifische

Energie. Sobald der Kennlinien-graph der spezifischen Energie aufgetragen über die Spandicke bestimmt wurde, wurde der Anteil der Energie, die in das Werkstück geht, abgeschätzt. Dies ermöglichte eine angemessene Vorhersage der Schleiftemperatur. Insbesondere eignete sich die Methode für Außenrundscheifprozesse bei welchen die Konvektion an das Kühlmittel minimal ist

und die Eingriffsverhältnisse leicht berechnet werden können. Die ständig wechselnde Kontaktlänge während des Nockenwellenschleifens erschwert jedoch die Berechnung der Spandicken enorm. Dies führte dazu, dass bisher noch keine zufriedenstellenden Temperaturvorhersagen beim Nockenwellenschleifen getroffen werden konnten. Die komplexe Schleifkinematik erschwert

diese Vorhersagen durch die Abhängigkeit der Wärmeenergieerzeugung von dem Zeitspannungsvolumen und der spezifischen Energie. Beide Faktoren variieren nicht

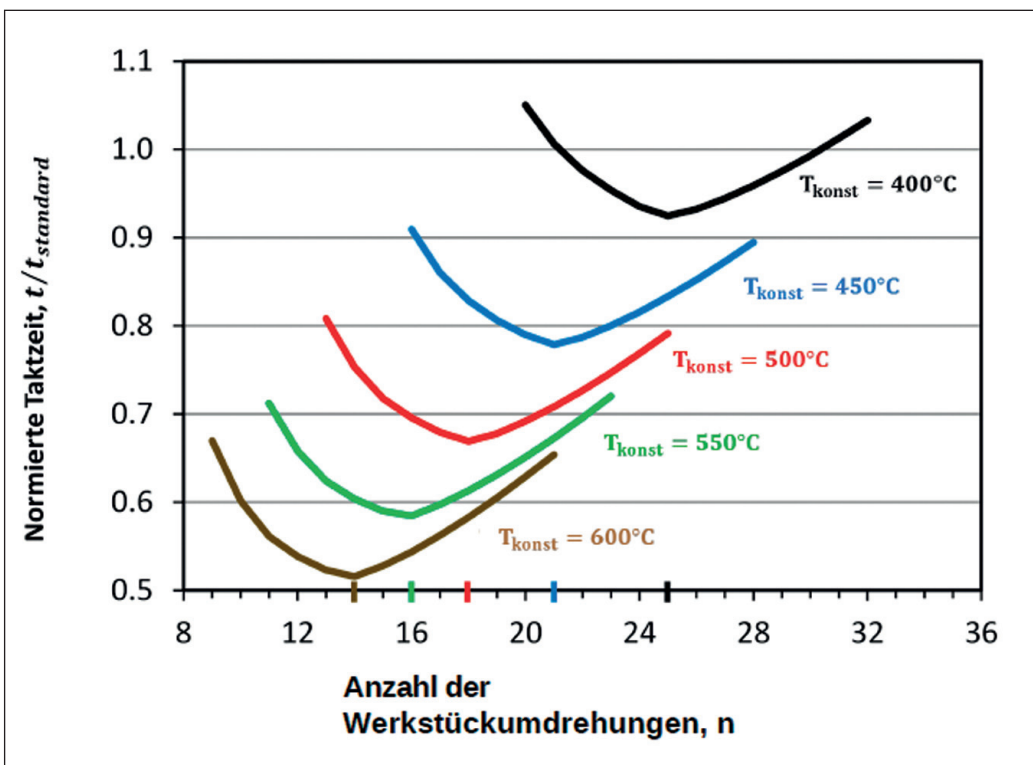


Bild 4: Bezogene Zykluszeiten und Anzahl der notwendigen Werkstückumdrehungen in Abhängigkeit der Werkstückoberflächentemperatur



## Ihre Spezialisten für Hochleistungs-Kühlschmierstoffe

für das Schleifen und Honen von Hartwerkstoffen mit Diamant- und CBN-Werkzeugen

- Industrieschmieröle und Hydrauliköle
- Kühlschmierstoffe für die Metallbearbeitung auch mit MMS und MMKS
- Spezialöle für die spanlose Kaltverformung auch mit MMS und MKS
- Härteöle und Vergüteöle – Dielektrika
- HFA Presswasserzusätze für die Wasserhydraulik und für die IHU
- Reiniger und Rostschutzöle
- Trennmittel
- Glas-, Keramik- und Halbleiterbearbeitungsmittel

**MKU-Chemie GmbH** | Rudolf-Diesel-Straße 7 | 63322 Rödermark  
Telefon: +49 6074 8752-0 | Telefax: +49 6074 8752-55 | [info@mku-chemie.de](mailto:info@mku-chemie.de)

[www.mku-chemie.de](http://www.mku-chemie.de)

nur während einer Werkstückumdrehung, sondern auch durch die ständig wechselnde Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück.

Ruck: Die technischen Grenzen der Schleifmaschinen machen die Angelegenheit noch komplizierter, so können deren Achsen nicht unbeschränkt schnell oszillieren und ihre Richtung wechseln oder das Werkstück beliebig schnell beschleunigen oder abbremsen. Insbesondere Rucke spielen eine wichtige Rolle bei der Schleifbearbeitung. Der Ruck errechnet sich aus der dritten Ableitung der Position, d.h. die Änderung der Beschleunigung. Im vorliegenden Fall gibt es zwei Ruckarten: der erste Ruck beschreibt die Beschleunigung der Schleifspindel – wie schnell kann die Maschine die Linearbeschleunigung (Oszillation) der Schleifscheibe ändern, der

zweite Ruck bezieht sich auf die Beschleunigung der Werkstückgeschwindigkeit – wie schnell kann die Maschine die Rotationsbeschleunigung des Werkstücks ändern.

Das Ergebnis dieser Methode war eine „Versuche es. Hoff, dass es gelingt und dann teste es aus“-Herangehensweise. Der Maschinenbediener wählte einige Vorschübe und Zustellungen und untersuchte die Ergebnisse in der Hoffnung die Parameter richtig gewählt zu haben. Anschließend kontrollierte er die Oberflächenqualität und -abmessungen. Im Nachgang legte er auf Basis von Erfahrung und Intuition weitere Anpassungen des Prozesses fest. Sobald ein Parametersatz gefunden wurde, ließ er das Werkstück auf thermische Schädigungen hin untersuchen. Falls das Werkstück keine thermischen Schädigungen

aufwies, wurden die Parameter beibehalten. Falls nicht, wurden weitere Parameterkombinationen getestet.

Ein Treffen der Ideen: Im Jahr 2013 trafen sich drei Ingenieure, die sich schon aus gemeinsamen Arbeiten zum Thema „Unrundschleifen“ kannten, und starteten eine Diskussion über das Schleifen von Nockenwellen. Peter Krajanik aus Schweden promovierte zum Thema Schleifen und arbeitete für Scania, einem der weltweit führenden Hersteller von Nutzfahrzeugen; Radovan Dražumerič aus Slowenien, ein Ph.D. der Mechanik und angestellt an der Universität von Ljubljana; und Jeff Badger aus den Vereinigten Staaten, promovierte ebenfalls zum Thema Schleifen und arbeitet als unabhängiger Berater in der Schleiftechnik, wobei er sich selbst den „Grinding Doc“ nennt.

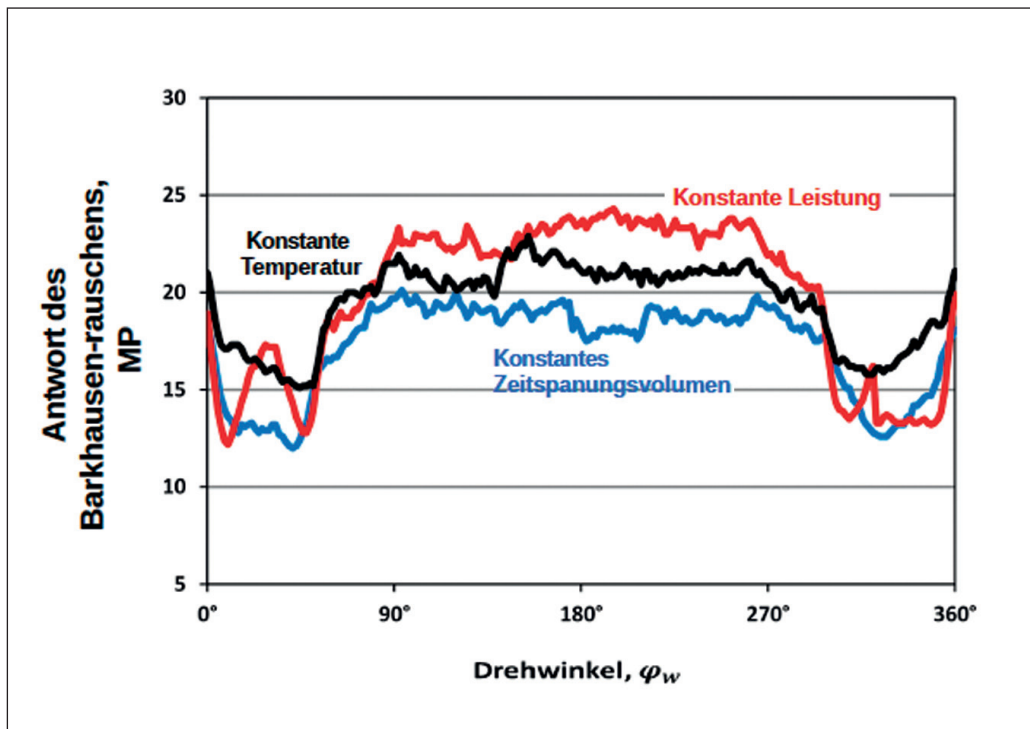


Bild 5:  
Barkhausenrauschen  
(Werkbilder; Scania)

turgrenze auf 600 °C würde eine Reduzierung der Anzahl auf 14 ermöglichen. Letztendlich wurde sich auf eine Temperaturschwelle von 441 °C geeinigt. Die Nockenwellen wurden nun mit den neuen Parametern geschliffen. Die Oberflächenqualität und die Werkstückgeometrie

Peter erkannte die Komplexität des Nockenwellenschleifens. Jeff gestand es immer aufgrund seiner Komplexität vermieden zu haben und Radovan bezeichnete die Kinematik als einfach, gab aber auch zu, dass er nichts über das Schleifen wusste.

Und so wurde der „Konstante Temperatur Schleifprozess“, kurz KTS, entwickelt. Die komplexe Kinematik und die sich ständig ändernden Eingriffsverhältnisse des Schleifprozesses wurden bestimmt und dann mit dem Jaeger-Modell im KTS angewendet. Anhand eines schnellen Schleifexperiments an zylindrischen Werkstücken wurde der Kennliniengraph (spezifische Energie aufgetragen über die Spandicken) bestimmt. Nun konnten die Energieanteile, die die Körner in Reibung und Spanbildung umsetzen an jedem Punkt entlang der Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück gegenübergestellt werden. Infolgedessen konnte die erzeugte Wärmemenge bestimmt werden. Diese Kurve lieferte die Eingangsdaten für das Modell zur Suche nach den optimalen Bedingungen. Hierbei lag eine

konstante Temperatur von 450 °C vor bei der das Werkstück keine thermischen Schädigungen erfuhr. Im nächsten Schritt wurden die Maschinenbeschränkungen dem Modell hinzugefügt. Die Ingenieure arbeiteten mit einem CNC-Maschinenhersteller zusammen, um die Rucklimitierungen der Maschine zu ermitteln. Ohne die Maschinenbeschränkungen wurde die kürzeste Taktzeit bei einer möglichst geringen Schleifzustellung und einer hohen Werkstückdrehzahl erreicht. In diesem Fall waren die Werkstückumdrehungen und die linearen Schleifspindelrücke enorm hoch. Mit Einführung der Maschinenbeschränkungen änderten sich die Bedingungen zur Erreichung der optimalen Schleiftemperatur. Die Ergebnisse können Bild 3 entnommen werden.

Für eine Schleiftemperaturgrenze von 450 °C lag die optimale Anzahl von Werkstückumdrehungen bei 21. Eine Verringerung der Schleiftemperaturgrenze auf 400 °C würde eine Änderung der Anzahl der Werkstückumdrehungen auf 25 erfordern. Eine Erhöhung der Schleiftempera-

und deren Lage innerhalb der Toleranzen können vergleichsweise einfach bestimmt werden. Schleifbrand zu messen und quantifizieren ist demgegenüber recht anspruchsvoll. Zuvor waren die folgenden Möglichkeiten die Einzigen, um das Auftreten von Schleifbrand zu bestimmen: 1) Trennen, Polieren und Ätzen des Werkstücks, um anschließend seine Mikrostruktur unter dem Mikroskop nach einer "weißen Schicht" zu untersuchen; 2) Heraustrennen eines kleinen Volumenelements zur Röntgenbeugungsanalyse; oder 3) Tränken des gesamten Werkstücks in Salpetersäure, um dann im Falle einer thermischen Schädigung eine „weiße Schicht“ sehen zu können. Jede der genannten Methoden ist sehr zeitaufwendig und darüber hinaus sind die ersten beiden zerstörend. Erfreulicherweise erlaubt es die Methode des Barkhausenrauschens die Werkstücke zerstörungsfrei auf Erweichung sowie Veränderungen des Eigenspannungszustands und Phasenänderungen des Werkstoffs zu untersuchen. Scania lässt alle hergestellten Nockenwellen einen

# Wirtschaftliche Feinstbearbeitung

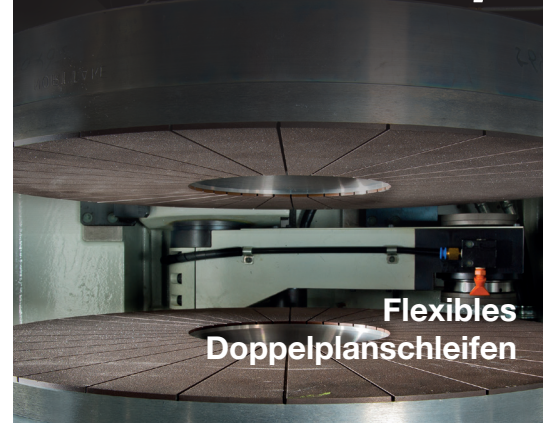


anspruchsvollen Barkhausenrauschen-Test durchlaufen, um eine hundertprozentige Qualität zu gewährleisten.

Die Ergebnisse der Barkhausen-Tests zeigt Bild 5. In diesem Bild wird deutlich, dass das Barkhausenrauschen unter einem vorbestimmten sicheren Schwellenwert gehalten wurde.

Eines der Hauptziele des Projekts war die Reduktion der Zykluszeit. Mit der KTS Methode wurde die Zykluszeit um 20 % im Vergleich zur „Konstanten Zeitspannungsvolumen Methode“ und um 40 % verglichen mit der „Konstanten Leistungs Methode“ reduziert. Für ein Unternehmen, das Tausende von Nockenwellen in einer Woche produziert, bei Kosten von über einer Million Dollar pro Schleifmaschine, bedeutet dies erhebliche Kosteneinsparungen, ganz zu schweigen von einem robusteren und zuverlässigeren Prozess. Scania hat den neuen KTS-Prozess in alle Maschinen am Motorproduktionsstandort in Södertälje, Schweden, integriert. Im Anschluss durchlaufen alle Teile ein gründliches Testprogramm zur Sicherstellung der Oberflächengüte, der Einhaltung der Toleranzen und zum Ausschluss von thermischen Schädigungen mit Hilfe des Barkhausenrauschens. Zusammenarbeit: Die vorgestellten technologischen Innovationen sind das Ergebnis einer erfolgreichen Partnerschaft aus Industrie und Hochschulen, die Zusammenführung erfahrener Forschungsexperten und Berater auf der „Technologie-Push“-Seite und von Engineering Managern, Prozessplanern und Maschinenbedienern auf der „Technologie Pull“-Seite. Das Schleifen war ursprünglich eine Fähigkeit des Maschinenbedieners, der es in der Werkstatt durch „Trial & Error“ gelernt hat und der oft nach dem Prinzip des „Schleifens nach Gefühl und Erfahrung“ vorge-

gangen ist. Mittlerweile ist der Schleifprozess jedoch derart komplex geworden, dass weder eine einzige Person noch eine einzige Firma alle Aspekte gänzlich verstehen kann. So findet man häufig Schleifexperten, die sich auf eine Untergruppe einer Untergruppe des Schleifens, zum Beispiel das Rattern beim Schleifen, spezialisiert haben. Maschinenhersteller sind Experten im Bauen von Maschinen, deren Expertise jedoch nicht in der detaillierten Kenntnis der kinematischen und dynamischen Vorgänge während der Schleifscheibe-Werkstück-Interaktion liegt. Von Experten mit einem Ph.D. in Fachbereichen der Kinematik und/oder der Dynamik kann nicht erwartet werden, dass sie alles über die tribologischen Vorgänge in Schleifprozessen wissen. Und Schleifexperten können zwar ein tiefgreifendes Wissen über die thermische Modellierung des Schleifprozesses haben, verstehen jedoch nicht zwangsläufig alle Aspekte der Methode des Barkhausenrauschens. Gegenwärtig konstruieren die meisten Schleifmaschinenhersteller eine Maschine und übergeben Sie mit einer „Viel Glück“-Einstellung dem Kunden. Die Prozessentwicklung wird infolgedessen oft den Kunden selbst überlassen. Schleifscheiben- und Schmierstoffhersteller verhalten sich oft ähnlich. Allerdings ändern sich die Zeiten, so dass einige Schleifmittelhersteller Partnerschaften mit Schleifscheibenherstellern, Schleifexperten, Maschinenherstellern, Kühlschmierstoffherstellern und dem Kunden aufbauen, um dem Endanwender eine „ganzheitliche Schleiflösung“ bieten zu können. Es scheint, dass diese Herangehensweise der einzig richtige Ansatz ist einen optimierten, robusten und konsistenten Prozess für immer komplexer werdende Schleifaufgaben zu liefern.



Flexibles Doppelpfanschleifen



Optimierung aller Bauteilgeometrien



Microfinish-Lösungen für alle Industriezweige



**Besuchen Sie uns auf der GrindTec 2016!**  
**16. – 19. März in Augsburg**  
**Halle 5, Stand 5063**

Thielenhaus Technologies GmbH  
Schwesterstr. 50  
42285 Wuppertal / Deutschland  
Telefon: +49 (0) 202 481-0  
Fax +49 (0) 202 45 04 45  
www.thielenhaus.com



**THIELENHAUS**  
**MICROFINISH**