

Gerhard Flores, Andreas Wiens

## Formhonen, ein fertigungstechnischer Beitrag zur Reduzierung von Reibung im Verbrennungsmotor

### Zusammenfassung

In der bisherigen Fertigung von Verbrennungsmotoren besteht die Forderung nach Zylinderbohrungen mit hoher Zylinderform- und Oberflächengüte. Die Bearbeitungsmakroform bleibt jedoch dem Motor aufgrund unterschiedlicher Einflüsse für die Funktion so nicht erhalten. Sie bewirken im Betriebszustand komplexe Verzugsmechanismen, welche die Zylinderlaufbahn deutlich abweichend von der angestrebten ideal-zylindrischen Form deformieren. Es wurde daher ein Honverfahren entwickelt, welches nicht die zylindrische Bohrungsform zum Ziel hat, sondern bereits eine Verformung fertigungstechnisch vorhält, so dass unter bestimmten Betriebsbedingungen sich zylindrische Bohrungsmantelflächen einstellen. Es wird berichtet über das Prinzip des Formhonnens, den Verfahrenskomponenten und den erzielten Ergebnissen.

### Abstract

The existing machining of internal combustion engine demands cylinder bores with high cylindricity and surface quality. But the macro shape is not preserved to the engine due to different influences upon the function. In operational condition they cause complex distortive mechanisms which deform the cylinder bore considerably regarding the intended ideal-cylindrical shape. For this purpose a honing process was developed which does not aim at a cylindrical machined shape but which takes already a lead of machined deformation in order to assure cylindrical bore surfaces under certain operational conditions. Report is given about the principle of form honing, the process components and the achieved results.

### Motivation

Die aktuell wichtigste Zielgröße bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren für Kraftfahrzeuge ist die Reduktion des Kraftstoffverbrauches und somit auch eine Reduktion der Schadstoffemissionen. Hier steht der CO<sub>2</sub>-Wert [g/km] im Vordergrund. Um auf diese Forderungen einzugehen, wird eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches durch die Verminderung der innermotorischen Reibung angestrebt. Besonders potenzialträchtig ist dabei die Optimierung des tribologischen Systems zwischen Zylinderlaufbahn und Kolbenring.

Im bisherigen Honprozess werden Zylinderlaufbahnen mit möglichst geringen Abweichungen von wenigen Mikrometern von der Idealzylinderform hergestellt. Diese hohen Genauigkeiten stehen jedoch dem befeuerten Motor nicht zur Verfügung, da unterschiedliche Deformationen auf die Zylinderbohrung einwirken und somit ungünstige Einflüsse auf die motorische Funktion ausüben. Neben den fertigungstechnischen Abweichungen können durch Montagekräfte an Zylinderkopf und Nebenaggregaten Verformungen am Zylinderrohr auftreten. Darüber hinaus entstehen zusätzlich thermische und dynamische Verzüge, welche sich je nach Motorkonstruktion auf lokale radiale Formabweichungen von ca. 40-70  $\mu\text{m}$  aufsummieren können. Durch das begrenzte Formfüllungsvermögen der Kolbenringe findet nur eine unvollständige geometrische Annäherung an die Verformungen des Zylinders statt, so dass der ungünstige Einfluss durch Blow-By und Ölverbrauch auf die Funktion des Motors wirksam werden kann.

Um die damit verbundene Forderung nach funktionszylindrischen Bohrungen zu erfüllen, wurde eine fertigungstechnische Verzugskompensation entwickelt. Dies bedeutet, dass durch den Bearbeitungsprozess Verzüge vorgehalten werden, die sich dann nach der Montage und bei einem bestimmten Betriebspunktbereich des befeuerten Motors zu einer weitgehend zylindrischen Bohrung verformen. **Bild 1** zeigt den Lösungsansatz zur Kompensation von Zylinderverzügen.

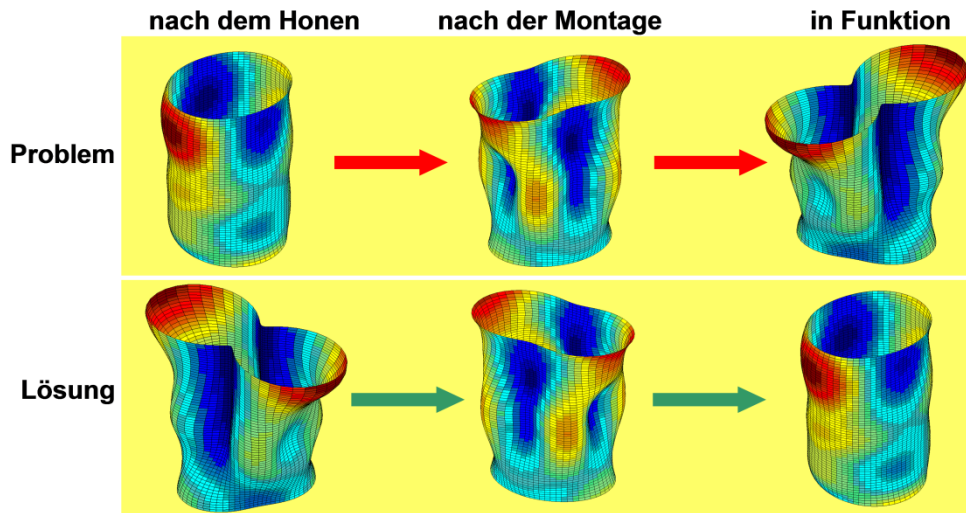


Bild 1: Lösungsansatz zur Kompensation von Zylinderverzügen

### Prinzip des Formhönens

Um die zu bearbeitende Zielkontur (Sollform) zur Kompensation der funktionsbedingten Zylinderverzüge zu definieren, dient zum Einen eine experimentelle Methode, bei der der Motorblock unter Brillenverspannung zylindrisch heißgehont wird [1]. Auch wenn die Temperaturverteilung dabei nicht dem Zustand des befeuerten Motors entspricht, ergibt sich nach der Demontage der Brille und dem Abkühlen des Motorblockes eine Form, die unter Funktionsbedingungen zu kleineren Zylinderverzügen als nach dem konventionellen Fertigungsprozess führt. Eine weitere Methode ist die Simulationsrechnung, welche sowohl die kaltstatischen, thermischen als auch die dynamischen Einflüsse berücksichtigen kann. Die dabei erhaltene Verzugsform ist für den Formhönprozess zu invertieren, so dass die gewünschte Sollform als Vorhaltekantur hergestellt werden kann. Diese Sollform ist definiert durch  $R/\varphi$ -Koordinaten [2], welche auf mindestens 8 Horizontalschnittebenen mit jeweils 256 Punkten am Umfang die zu honende Freiform ausreichend genau beschreiben.

Das Ziel des Formhönens (**Bild 2**) ist es nun, diese Sollform fertigungstechnisch umzusetzen und zwar so, dass beliebige Freiformen bis etwa zu harmonischen Formanteilen der 8. Ordnung herstellbar sind. Neben dieser hoch aufgelösten anforderungsgerechten Sollform besteht die Forderung nach einer einheitlichen Gestaltung des Rauheitsprofils in allen Bereichen der formgehonten Bohrung [3]. So sollen die Profilausbildungen in allen formkritischen Merkmalen wie Einschnürungen, Ausprägungen und Übergängen der Freiform toleranzgerecht herstellbar sein. Dies gilt sowohl für eine konventionelle Peakhönung als auch für die komplexen Profildefinitionen einer Plateauhönung.

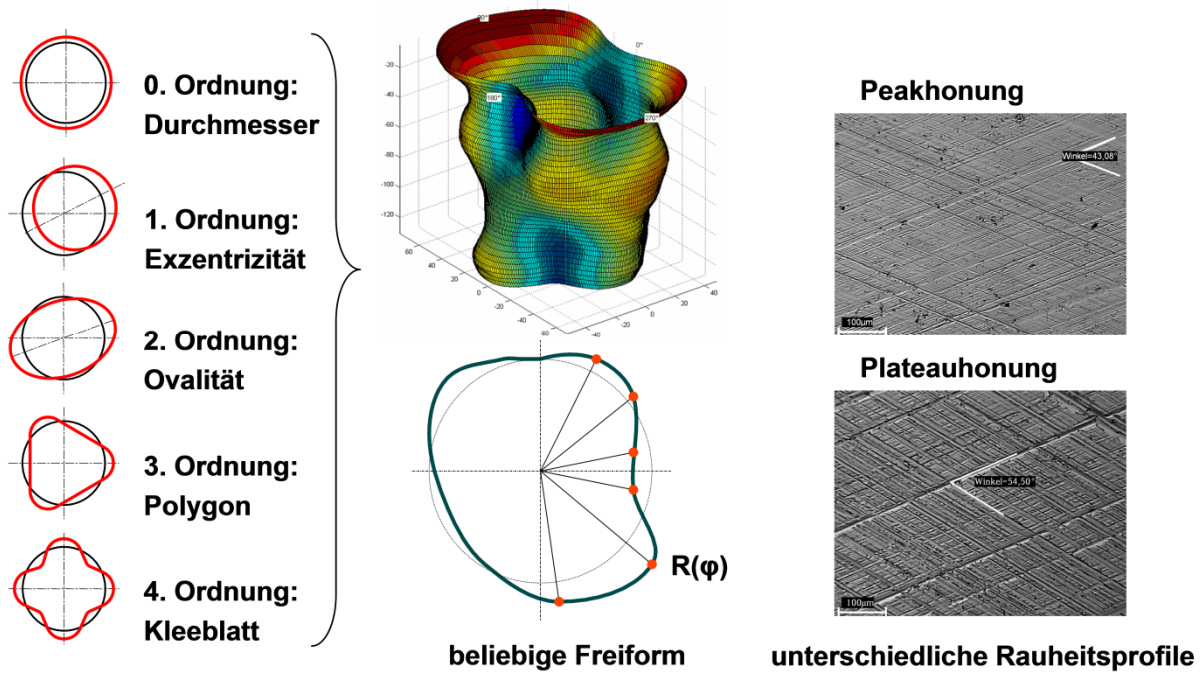


Bild 2: Ziele des Formhonsens

### Verfahrenskomponenten

Um das Formhonen fertigungstechnisch umsetzen zu können (**Bild 3**), bedarf es einer Vielzahl von Innovationen mit der notwendigen Dynamik und Differenziertheit zur Ansteuerung der Arbeitsflächen der Diamanthonleisten.

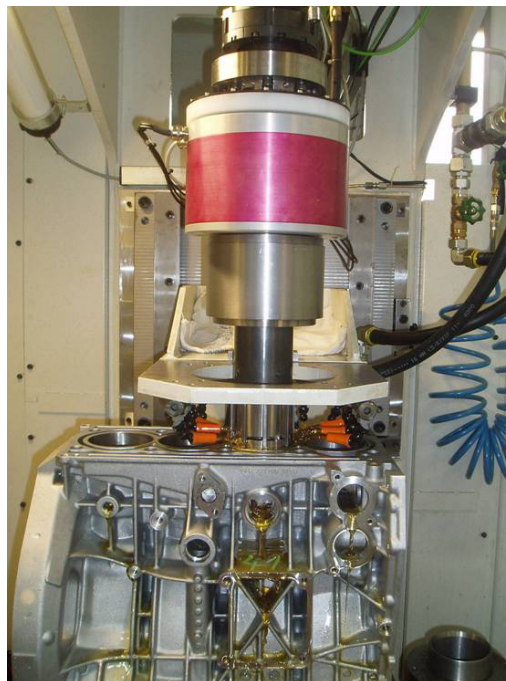
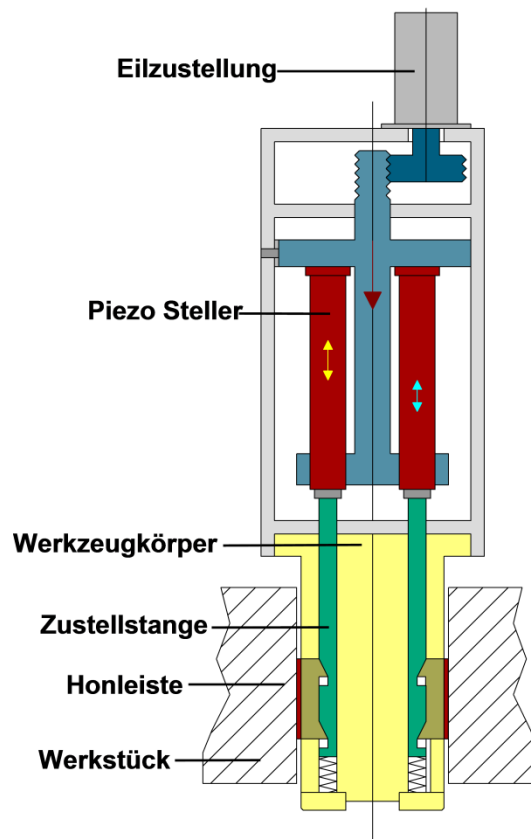


Bild 3: Formhonenbearbeitung eines R4-Blockes

Hierzu wurde ein Zustell- und Werkzeugkonzept entwickelt, welches vier voneinander unabhängig zustellbare Honleisten aufweist. Zeitpunkt der radialen Zustellung, Zustellkraft und Zustellweg können sollformgerecht angesteuert werden, so dass die Arbeitsflächen der Honwerkzeuge mit ihrer Kinematik der gewünschten Sollform folgen

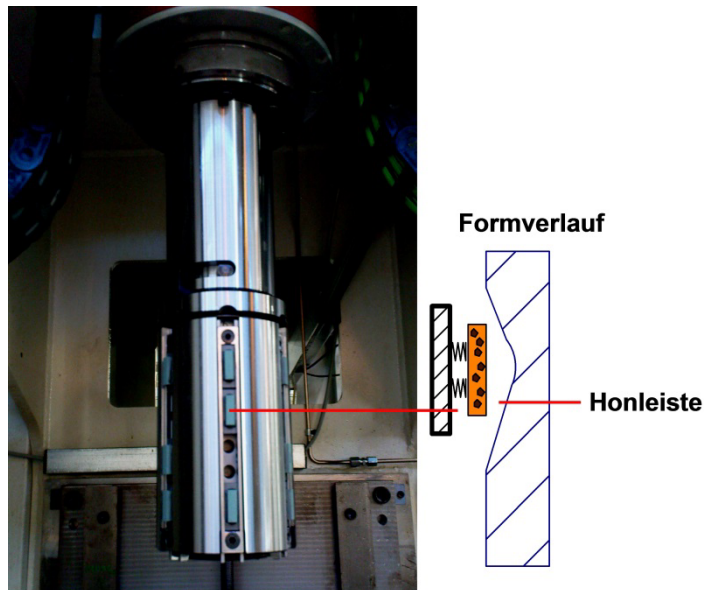
und somit in eine zylindrische Bohrung die beliebige Freiform hineinschneiden. Da die vier Honleisten aufgrund der kurzwelligen axialen Formausprägungen nur eine sehr begrenzte Baulänge haben können, muss dafür gesorgt werden, dass während des Formhonprozess über die gesamte Bohrungsfläche unabhängig von der lokalen Formausprägung eine konstante Kontaktzeit der Honleistenarbeitsfläche an allen Stellen der Mantelfläche erreicht wird. Dies ist eine Funktion der Prozessparameter, u. a. abhängig von Honleistenlänge, Hubgeschwindigkeit, Hubbeschleunigung, Drehzahl, Anzahl der Honleisten und Dimensionen der Bohrung. Die Honzeit ist darüber hinaus abhängig von der Materialzugabe, der Tiefe der Formausprägung und von der Dimension der Bohrung. Um in den Bereich der üblichen Bearbeitungszeiten von Zylinderbohrungen in PKW-Motoren von  $< 30$  s zu gelangen, sind darüber hinaus die Schnittgeschwindigkeiten erforderlich, welche bei metallgebundenen Diamanthonleisten zu der gewünschten Selbstschärfung führen. Mit einer Drehzahl von bis zu 400 1/min können z. B. mit Zustellfrequenzen von bis zu 32 Hz Formanteile der 5. Ordnung mit einer radialen Ausprägung von  $60 \mu\text{m}$  hergestellt werden. Auch höhere Ordnungen sind möglich, da hier die Amplituden i. d. R. kleiner sind. Diese unabhängige Zustellcharakteristik der einzelnen Schneidleiste hinsichtlich Dynamik, Kraft und Weg ist nur möglich, mit der Verwendung leistungsfähiger piezoelektrischer Steller.



**Bild 4: Piezoelektrische Zustelleinrichtung**

**Bild 4** zeigt die piezoelektrische Zustelleinrichtung mit der Eilzustellung, den Piezostellern und dem Formhonwerkzeug. Mit der Eilzustellung wird zunächst der gesamte Piezozustellstrang, die Zustellstangen und die Honleisten bis zum Anlegen der Arbeitsflächen an die Bohrungswand bewegt. Von dieser Position aus werden die Piezosteller aktiviert und entsprechend der gewünschten Sollform lokal differenziert zugestellt. Die Honleistenlänge orientiert sich beim Formhonen nicht an der Bohrungslänge, sondern am axialen Sollformverlauf. Sie ist kürzer als die kleinste





**Bild 6: Glätthonwerkzeug mit elastisch gelagerten Honsegmenten**

Die gesamte Prozesskette besteht somit in der zylindrischen Vorhon-Bearbeitung, dann in einer oder zwei Formhonoroperationen (je nach Tiefe der Formausprägung) und abschließend in einer nachfolgenden Glättoperation. Um den Prozess fertigungstechnisch beherrschbar zu machen, ist eine Post-Prozess-Formgestaltsmessung notwendig. Hierzu dient ein pneumatisch arbeitender Düsenmessdorn (Prinzip Stotz), welcher mit einem Messbereich von  $150\ \mu\text{m}$  in  $15\ \text{s}$  und einer Wiederholgenauigkeit von  $\leq 2\ \mu\text{m}$  die Bohrung vermisst. Dieses Messverfahren ist unempfindlich für Schwingungs- und Schmutzeinflüsse und kann im Bearbeitungsraum neben den Honspindeln eingesetzt werden. Damit wird sowohl die Bohrungsform ermittelt, als auch das Diametralmaß, welches als Kolbenfüßmaß der Bohrung festgelegt ist. Über Feedback Steuerungen lassen sich Diametralmaß und Sollform toleranzgerecht stabilisieren.

### Ergebnisse

Das bisher entwickelte Formhonen liefert in engen Grenzen reproduzierbare Freiformen, welche maximal  $\pm 3\ \mu\text{m}$  von der Sollform abweichen. Statistische Toleranzeinschränkungen sind hierin nicht enthalten (**Bild 7**). Die gesamte Honzugabe beim Formhonen, ausgehend von der zylindrisch vorgehonten Bohrung beträgt je nach Formausprägung min.  $0,03$  bis  $0,05\ \text{mm}$  im Durchmesser zuzüglich der radialen Formtiefe. Die Formtolerierung erfolgt durch die Anordnung von Hüllkurven im Abstand der gewünschten Toleranz um die Sollformvorgabe. Darüber hinaus sind auch die Amplituden der jeweiligen Ordnung zu tolerieren. Durch Subtraktion der Istform von der Sollform können die Einflüsse höherer Ordnungen als schädliche Größe auf die Funktion beurteilt werden. Die Bearbeitungszeiten zum Formhonen betragen im Bereich der Nutzfahrzeugmotoren ca.  $50\ \text{s}$ , bei PKW-Motoren ca.  $30\ \text{s}$ . Die piezoelektrische Zustellung hat sich bisher als zuverlässig und genau arbeitende Technologie erwiesen.

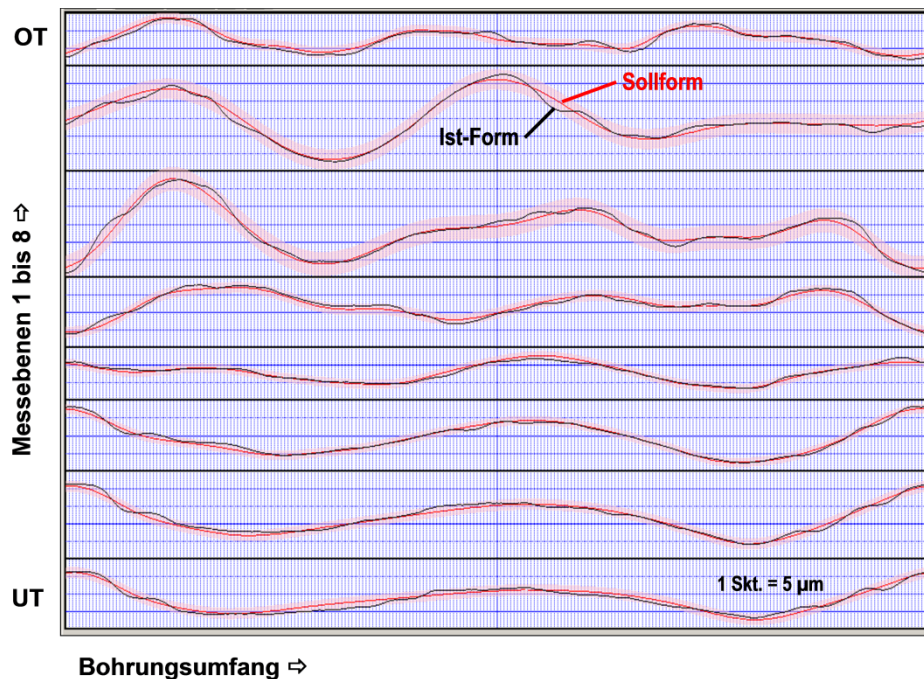
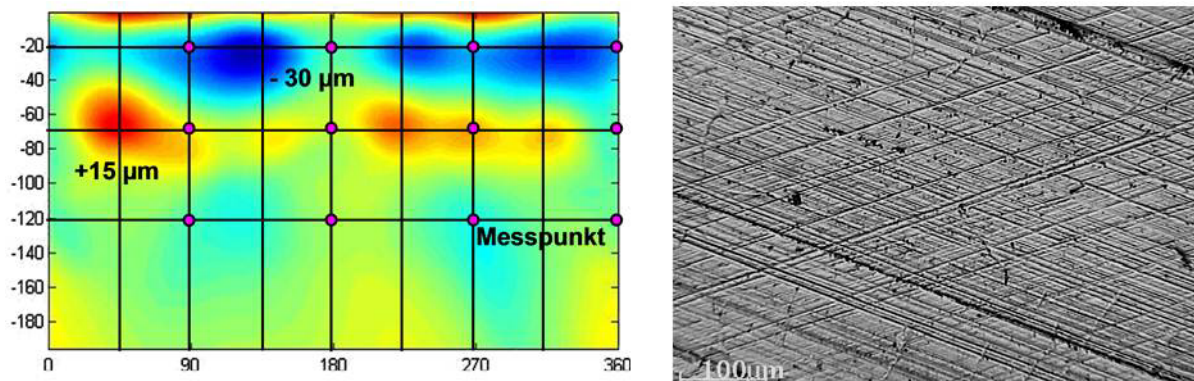


Bild 7: Freiform einer Zylinderbohrung

Neben der Form konnten auch Topographien mit Plateau-Strukturen an der gesamten formgehohten Mantelfläche zuverlässig erreicht werden. **Bild 8** zeigt ein derartiges Plateau-Profil mit den Messpunkten, welche sich sowohl in den Formausprägungen ( $+15 \mu\text{m}$ ) als auch in den Formeinschnürungen ( $-30 \mu\text{m}$ ) befinden. Die gewünschten Toleranzen der Oberflächenmaßzahlen  $R_{pk}$ ,  $R_k$  und  $R_{vk}$  konnten im vollen Umfang erreicht werden. Damit ist die Oberflächengüte vergleichbar mit dem konventionellen Honverfahren der Serie.



Messpunkte im Formverlauf, Plateau-Profil:  $R_{pk} \leq 0,2 \mu\text{m}$ ,  $R_k = 0,2 - 0,8 \mu\text{m}$ ,  $R_{vk} = 05 - 1,4 \mu\text{m}$

Bild 8: Freiform mit Plateau-Profil

### Ausblick

Mit dem entwickelten Stand des Formhонverfahrens sind auch Freiformen mit über  $50 \mu\text{m}$  lokaler Formabweichung darstellbar. Die Oberflächengüte und die Taktzeiten entsprechen dem konventionellen Honprozess. Funktionsvorteile am befeuerten Motor konnten anhand Ölverbrauch und Emissionen nachgewiesen werden. Da es sich um eine Modifikation des gesamten tribologischen Systems handelt, sind den formgehohten Laufbahnen auch Kolben und Kolbenringpakete hinsichtlich der Anpresskraft und der geometrische Gestalt anzupassen. Fertigungstechnisch ermöglicht das Formhонen eine Substitution der Honbrillentechnik und liefert damit nicht nur Funktionsvorteile, sondern

auch Fertigungsvorteile mit Kostenreduzierung. Die derzeitigen Standmengen von Formhohlleisten sind für eine mittelgroße Serienfertigung geeignet, sie müssen jedoch noch weiter optimiert werden. Darüber hinaus liegen umfangreiche Erfahrungen mit PKW-, Nutzfahrzeug und stationäre Motoren vor. Es können sowohl Gusseisen, Aluminiumlegierungen als auch die vielfältigen Varianten der thermischen Spritzschichten formgehoht werden. Die Einführung in die Serienfertigung wird derzeit vorbereitet.

Damit ist das Formhonen ein innovativer zukunftsfähiger Honprozess, der zur Effizienzsteigerung und signifikanten Emissionsreduzierung von Verbrennungsmotoren einen wesentlichen Beitrag liefert. Aufgrund vorliegender Erkenntnisse sind somit die Voraussetzungen für eine Serienbearbeitung der untersuchten Kurbelgehäuse geschaffen.

### **Danksagung**

Neben dem Co-Autor haben Andreas Wagner (Prozessentwicklung) und Klaus Litty (Software und Steuerung) einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung des Verfahrens geleistet. Für Ihre kreative und kompetente Mitarbeit gilt Ihnen freundlicher Dank.

### **Literatur**

[1] Wiens, A.; Lahres, M.; Hoffmeister, H.-W.; Flores, G.: Fertigungstechnischer Ansatz zur Kompensation von Zylinderverzügen mittels Formhonen, VDI-Berichte Nr. 2109, 2010, Seite 133 – 145, VDI-Wissenforum GmbH, Düsseldorf

[2] Flores, G.; Klink, U.; Abeln, T.: Honen von Funktionsformen in Zylinderkurbelgehäusen, VDI-Berichte Nr. 1994, 2008, Seite 79 – 89, VDI-Wissenforum GmbH, Düsseldorf

[3] Wiens, A.; Flores, G.; Klink, U.; Abeln, T.: Makroform- und Mikroformbearbeitung von Zylinderbohrungen mittels Freiformhonen, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, Verfahren und Maschinen, 63. Ausgabe, 2007, Seite 329 – 339, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

[4] Wiens, A.: Formhonen von Zylinderlaufbahnen. Dissertation, TU Braunschweig, 2011

[5] Wiens, A.; Lahres, M.; Hoffmeister, H.-W.; Flores, G.: Formhonen von Zylinderlaufbahnen in Kurbelgehäusen mittels eines piezoelektrischen Formhonenwerkzeuges, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, Verfahren und Maschinen, 64. Ausgabe, 2009, Seite 265 – 280, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

### **Autorenanschrift:**

Dipl.-Ing. (FH) Gerhard Flores und Dr.-Ing. Andreas Wiens  
Gehring Technologies GmbH  
73760 Ostfildern  
Gehringstr. 28  
gerhard.flores@gehring.de  
andreas.wiens@gehring.de