

# **Adaptronisches Formhonen – Fertigungsverfahren zur Kompensation von Zylinderverzügen**

*Drossel, W.; Hochmuth, C.; Treppe, F.; Schneider, R.*

## **Abstract**

Die Anforderungen an die Fertigbearbeitung von Zylinderlaufbahnen sind durch die Qualitätsmerkmale Rundheit und Zylinderform sowie die Ausprägung des Oberflächenprofils definiert. Am Beispiel der Hubkolbenverbrennungsmaschine stellen sich jedoch sowohl montage- als auch betriebsbedingte Verzüge der Zylinderform ein. Da das Vermögen der Kolbenringe, den Brennraum stets zuverlässig abzudichten beschränkt ist, verschlechtert sich der Wirkungsgrad und der Ölverbrauch steigt.

Einen fertigungstechnischen Ansatz zum Erzeugen einer freien Form in der Zylinderbohrung stellt das Adaptronische Formhönverfahren dar<sup>1</sup>. Ziel ist, inverse Verzugsgeometrien als Makroformen vorzuhalten. Diese stellen dann unter Wirkung der Verzugsmechanismen im gewünschten motorischen Betriebsbereich wieder ideale Zylinderformen dar. Die Werkzeug- und Verfahrensentwicklung sowie die Auswertung von Bearbeitungsergebnissen hinsichtlich Produktivität, Formgenauigkeit und Oberflächentopografie werden dargestellt und als Potentiale für die Optimierung des tribologischen Systems Kolben, Kolbenring, Zylinderlaufbahn gewertet.

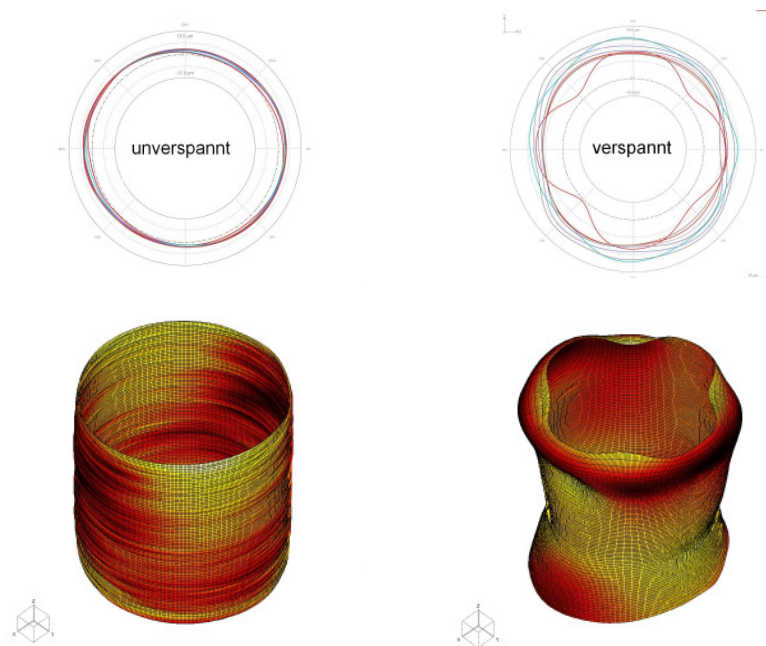
## **1 Einleitung**

In der Motorentechnik kommt dem Bauteil Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) als zentralem Teil des Motors eine große Bedeutung zu. Dabei muss auf die Formstabilität des gesamten ZKG und insbesondere auf die Zylinderform der Kolbenbohrungen großer Wert gelegt werden. Ebenso kommt der Ausprägung des Oberflächenprofils eine signifikante Rolle zu. Denn diese Qualitätsmerkmale bestimmen wesentliche Funktionsgrößen wie Öl- und Kraftstoffverbrauch sowie Abgasverhalten des Motors. So ist der höchste Anteil (75 bis 90 %) des ungewollten Ölverbrauches sowie 40 bis 50 % der im Verbrennungsmotor auftretenden mechanischen Verluste dem tribologischen System Kolben, Kolbenring, Zylinderlaufbahn zuzuordnen.

Bei Hubkolbenverbrennungsmaschinen stellen sich sowohl montage- als auch betriebsbedingte Verzüge der Zylinderform ein. Das Vermögen der Kolbenringe, sich den Formabweichungen anzupassen und so den Brennraum zuverlässig abzudichten ist beschränkt. Die Folge sind eine Verschlechterung des Wirkungsgrades und erhöhter Ölverbrauch.

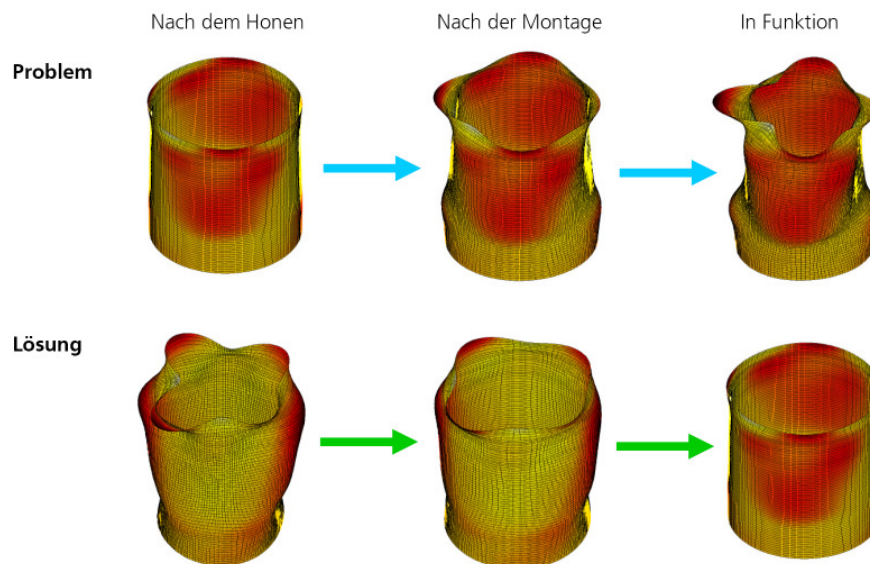
In einer Potenzialstudie konnte abgeleitet werden, dass sich für ein formoptimiertes Zylinderrohr in einem Referenzmotors ein mögliches Kraftstoffverbrauchspotenzial von 1,1 bis 1,5 % ergibt. Dieses setzt sich jeweils zu 25 bis 30% aus der Reduktion der Blow-by-Verluste und Kolbenhemdreibung sowie zu 40 bis 50% aus der reduzierten Kolbenringreibung zusammen [1].

Eine in der Serienfertigung angewendete Verzugskompensation kann durch die Montage eines nachstehend auch als Honbrille bezeichneten Verformungskörpers an die Zylinderkopfanbindung erzielt werden. Dies stellt einen erhöhten Fertigungsaufwand dar und beschränkt sich ausschließlich auf die statischen Verzüge durch die Zylinderkopfmontage. In Bild 1 sind eine unverspannte und eine verspannte Bohrungskontur qualitativ gegenübergestellt.



**Bild 1:** qualitative Gegenüberstellung einer unverspannten und verspannten Bohrungskontur

Einen fertigungstechnischen Ansatz zum Erzeugen einer freien Form in der Zylinderbohrung stellt das Formhonen mit adaptivem Werkzeug dar. Damit sind zwei Ziele verfolgbar. Zum einen können gezielt zylindrische Bohrungen mit höchsten Genauigkeiten bezüglich Rundheit und Zylinderform gefertigt werden. Und zum anderen sind definiert unrunde Bohrungen herstellbar. Mit der im weiteren Verlauf thematisierten letzteren Möglichkeit können Zylinderverzüge jeglicher Art als Inverskontur vorgehalten werden. Das Ziel dabei ist, dass sich die jeweils erzeugte Makroform im gewünschten motorischen Betriebsbereich wieder zu einer idealen Zylinderform verformt. Der prinzipielle Lösungsansatz geht aus Bild 2 hervor.



**Bild 2:** *prinzipieller Lösungsansatz für die Unrundbearbeitung mit dem adaptronischen Formhonen*

Das adaptronische Formhonen substituiert im zumeist mehrstufigen Honprozess eine Honstufe. Nachstehend werden weitere Vorbetrachtungen, die Werkzeug- und Verfahrensentwicklung sowie die Auswertung von Bearbeitungsergebnissen hinsichtlich Produktivität, Formgenauigkeit und Oberflächentopografie dargestellt.

## **2 Vorbetrachtungen**

Bei der konstruktiven Auslegung von Zylinderkurbelgehäusen ist man Zielkonflikten ausgesetzt. So kann eine Steifigkeitserhöhung in einem lokalen Bereich einer thermodynamisch bedingten Forderung höherer Priorität untergeordnet sein. Im Zuge der Massereduzierung und Bauraumminimierung erscheint auch eine Steifigkeitserhöhung durch mehr Materialeinsatz als unmöglich. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass die unterschiedlichen Verzüge der Zylinderbohrungen konstruktiv zwar beeinflusst aber nicht verhindert werden können. Die Thematik rückt durch Downsizing- und Leichtbaustrategien heute und in Zukunft verstärkt in den Fokus der Motorenentwickler. Zylinderformabweichungen lassen sich grundsätzlich in drei Gruppen unterteilen.

*Statische* Verzüge entstehen durch die Fertigung und Montage. Letztere insbesondere durch die Anbindung des Zylinderkopfes und weiterer Peripherie am Zylinderkurbelgehäuse.

Unter *quasistatischen* Verzügen werden Verzüge verstanden, die durch die thermischen Belastungen im Betrieb auftreten. Besonders über den Umfang der Zylinderbohrung verteilte Temperaturunterschiede sind ausschlaggebend für quasistatische Verzüge [2].

*Dynamische* Verzüge werden durch die Gaskräfte und vom Kolben übertragene Normal- und Führungskräfte im Betrieb des Motors verursacht.

In zahlreichen Arbeiten wurde sich mit der Bestimmung der Realkontur von Zylinderbohrungen durch unterschiedliche Messmethoden beschäftigt. Dies geht von der Messung eines mit Zylinderkopf verschraubten Zylinderkurbelgehäuses auf einer 3D-Messmaschine bis hin zu Messungen im befeuerten Motor, wobei Längenänderungen mit im Kolben verbauten Wirbelstromsensoren erfasst werden [3]. Die Größe der Zylinderformabweichungen kann sich im Bereich von wenigen Mikrometern bis zu Zehntelmillimetern bewegen [4]. Mithilfe einer Fourieranalyse lassen sich die Formabweichungen in Verzugskomponenten zerlegen. So können sie in radialer Richtung mit einem Ordnungswert und einer Amplitude beschrieben werden, wobei die Überlagerung von Ordnungen möglich ist. Die Auswertung erfolgt ebenfalls vertikal in mehreren Höhenschichten.

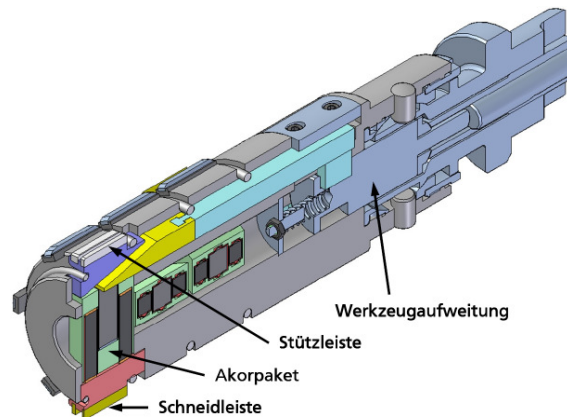
Zur Unrundbearbeitung von Zylinderbohrungen existieren fertigungstechnische Ansätze. Zum Beispiel das auf Basis hydraulischer Zustellung funktionierende „Variable Formhonen nach Zurrin“ [5], das „Unrundhonen durch ein Werkzeug mit unrunder Zustellnocke“ sowie das „Formhonen von Zylinderlaufbahnen in Kurbelgehäusen mittels eines piezoelektrischen Formhonwerkzeuges“ [4]. Die Anwendung eines der Verfahren in der Serienfertigung ist nicht bekannt. Bei letzterem Verfahren und dem dabei verwendeten Formhonwerkzeug befindet sich die Piezoaktorik außerhalb des Werkzeuges und die Bewegungsübertragung erfolgt über Zustellstangen und Umlenkpunkte. An derartigen konstruktiven Eigenschaften erfolgt eine klare Abgrenzung zum adaptronischen Formhonverfahren des IWU, was in der nachfolgend beschriebenen Werkzeugentwicklung deutlich wird.

### **3 Werkzeugentwicklung**

Der zugrunde gelegte Prozess ist dreistufig und umfasst das Vor-, Basis- und Glätthonen, wofür jeweils ein Werkzeug genutzt wird. Das Vorhonen läuft weiterhin konventionell ab. Das Basishonen wird durch das Formhonen mit dem neu entwickelten adaptiven Formhonenwerkzeug substituiert. Für die anschließende Glätthonoperation entstand ebenfalls ein neuartiges Werkzeug.

Im konkreten Fall wurde von der Bearbeitung von Zylinderkurbelgehäusen aus Grauguss ausgegangen. Speziell handelt es sich um ein Zylinderkurbelgehäuse von 4-Zylinder PKW-Dieselmotoren mit einem Bohrungsdurchmesser von 81 mm und einer Bohrungstiefe von 150 mm. Anforderungen an die Werkzeugkonstruktion hinsichtlich Zustellweg und Honleistenengeometrie lassen sich aus der Auswertung der zu fertigenden Sollkontur ableiten. Die Anforderungen an die Oberflächentopografie sind ebenfalls gegeben. Um eine dem Serienprozess entsprechende Produktivität erreichen zu können, ist für die werkzeug- und verfahrensseitige Entwicklung zudem die notwendige Zerspanleistung zu berücksichtigen.

Bezüglich der Werkzeugentwicklung wurde festgelegt, dass Formabweichungen bis zur 4. Ordnung (Kleeblattverzug) erzeugt werden sollen. Bei der Bestimmung der vorhandenen Formabweichung ergab sich ein Maximum von radial bis zu 20 Mikrometern. Die Auswertung der Formabweichungen erfolgte in Tiefenrichtung alle 2 mm. Als Kenngröße für die erforderliche Zerspanleistung wurde das Zeitspannungsvolumen bezogen auf die Honleistenfläche ( $Q'w$ ) herangezogen. D.h. in Vorversuchen mit dem konventionellen Honwerkzeug wurde das  $Q'w$  in Abhängigkeit vom Anpressdruck und maximal möglicher Schnittgeschwindigkeiten bestimmt. Damit konnte eine Auslegung des Werkzeuges hinsichtlich aktorischer Kennwerte sowie Honleistenfläche und -geometrie erfolgen. Um bei einer geforderten Maximaldrehzahl von 800 1/min Formabweichungen 4. Ordnung erzeugen zu können, ist zudem eine Aussteuerfrequenz der Aktoren von 70 Hz zu gewährleisten. Bei der Auswahl des Schneidstoffes für die Honleisten wurde sich am konventionellen Honwerkzeug orientiert.



**Bild 3:** adaptronisches Formhonwerkzeug in der Axialschnittdarstellung

Das entwickelte und in Bild 3 im Axialschnitt dargestellte adaptronische Formhonwerkzeug weist folgende Eigenschaften auf. Es besteht aus einem Werkzeuggrundkörper sowie drei radial und axial versetzten schwimmend gelagerten Schneidgruppen. Diese setzen sich über den Werkzeugdurchmesser aus Stützleiste, Aktorpaket und Schneidleiste zusammen. Die Stützleiste besteht aus dreifach geschlitzten Hartmetallplatten. Das Aktorpaket besteht entweder aus zwei Aktoren in Parallelschaltung oder aus drei Aktoren in Reihen- und Parallelschaltung. Damit sind ein Leerhub von 60 bzw. 80 Mikrometern, eine Blockierkraft von 4000 N sowie eine vertikale Kippung der Schneidleiste möglich. Die Schneidleiste ist ebenfalls 3-fach geschlitzt und besteht aus Diamant. Die mechanische Anbindung des Werkzeuges funktioniert konventionell über den Bajonettverschluss. Eine Überlagerung von aktorischer und konventioneller Aufweitung ist möglich. Die Energieübertragung für die Aktoransteuerung wird über ein Schleifringssystem an der Gelenkstange gewährleistet. Die Aktoren werden über Spannungsverstärker mit einer Spannung von bis zu 200 V angesteuert, während die analoge Steuerspannung aus der Maschinensteuerung zwischen 0 und 10 V beträgt.

Das Glätthonwerkzeug für die Finishbearbeitung der Zylinderbohrung verfügt über sechs radial angeordnete und jeweils axial 3-fach geschlitzte federnd gelagerte Honleisten. Damit ist gewährleistet, dass die Honleisten während der Bearbeitung der freien Form nachfolgen können und dabei auch ein konstanter Anpressdruck besteht. In Bild 4 ist das adaptronische Formhonwerkzeug und in Bild 5 das Glätthonwerkzeug dargestellt.



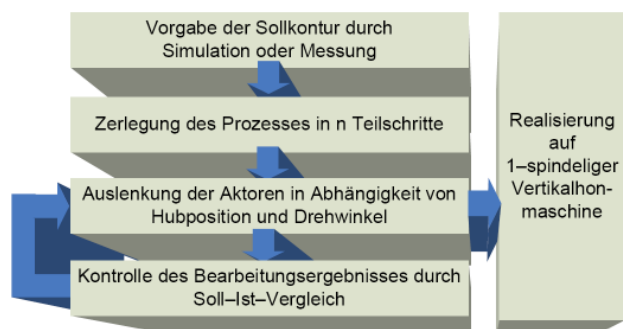
**Bild 4:** adaptronisches Formhonwerkzeug



**Bild 5:** Glätthonwerkzeug

## 4 Verfahrensentwicklung

Die Abschaltung des Formhonprozesses erfolgt bearbeitungsgesteuert über eine Beschreibung der Form und der Zerspanverhältnisse pro Honleistenüberlauf. Diese ist dem Honprozess vorangestellt. Der für das adaptronische Formhonverfahren entwickelte Prozessablauf geht aus Bild 6 hervor.



**Bild 6:** Prozessablauf für das adaptronische Formhonverfahren



Die Sollkontur kann durch Simulation oder Messung in Polarkoordinaten vorgegeben werden. Bei der Verarbeitung von Soll- und Istkontur in einem Technologiemodul werden Matrizen generiert, in denen hub- und drehwinkelabhängige Zustandswerte hinterlegt sind. Über eine Schnittstelle zur Honmaschinensteuerung werden die Zustandswerte in den Matrizen derart verarbeitet, dass daraus gebildete Spannungswerte für die Aktoren im Systemmanager der Steuerungskonfiguration mit den analogen Spannungsausgängen verknüpft werden. Die für die Auslenkung notwendigen Informationen über Drehwinkel und Hubposition werden aus der Maschine ausgelesen. So wird pro Hub eine Matrize abgearbeitet und der Prozess nach der generierten Anzahl von Matrizen gestoppt.

Bei der Kontrolle des Bearbeitungsergebnisses durch eine Formmessung wird bewertet, wie groß die Abweichungen zwischen Soll- und gefertigter Istkontur sind. Gleichzeitig wird eine Korrekturmatrix aus der Differenz von Soll- und Istkontur ausgegeben, die in der Honmaschinensteuerung verarbeitet wird und damit den Prozess stabilisiert. Die Vermessung kann stichprobenartig erfolgen, um z.B. ein Wegdriften des Prozesses aufgrund von Chargenunterschieden zu vermeiden.

## **5 Versuchsdurchführung und -auswertung**

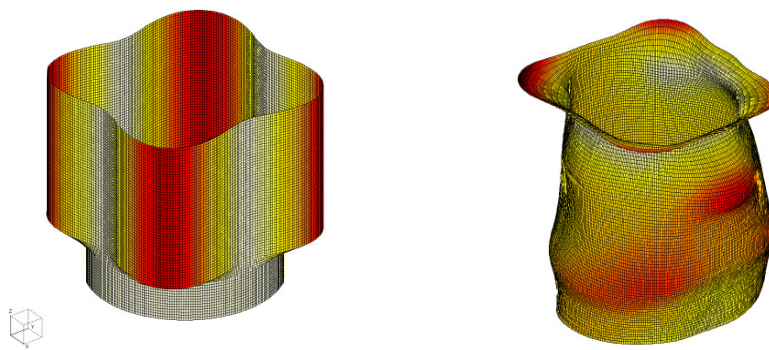
Die Honversuche wurden auf einer 1-spindeligen Vertikalhonmaschine mit einer Spindelkastenverschiebung und einem programmierbaren NC-Niederhalter durchgeführt. Die softwareseitige Implementierung des Formhonprogrammes ist in der originalen Honmaschinensteuerung realisiert.

### **5.1 Auswahl der Test- und Sollkontur**

Als Testkontur für das adaptronische Formhonen wurde eine Geometrie generiert, die Formabweichungen 4. Ordnung (Kleeblatt) mit einer Amplitude von 20 Mikrometern aufweist und bis zu einer begrenzten Tiefe in die Bohrung eingebracht wird. Damit kann eine Auswertung der Bearbeitungsergebnisse hinsichtlich Formgenauigkeit erfolgen und durch den Vergleich mit dem aktorisch nicht bearbeiteten unteren Teil der Bohrung Aussagen hinsichtlich der aktorischen Zerspanleistung getroffen werden. Verglichen mit einer invers zu erzeugenden Realkontur des kaltstatischen Verzuges beträgt das maximale radiale

Bearbeitungsaufmaß ebenfalls ca. 20 Mikrometer. Damit kann die Produktivität im Vergleich mit dem konventionellen Honprozess bewertet werden.

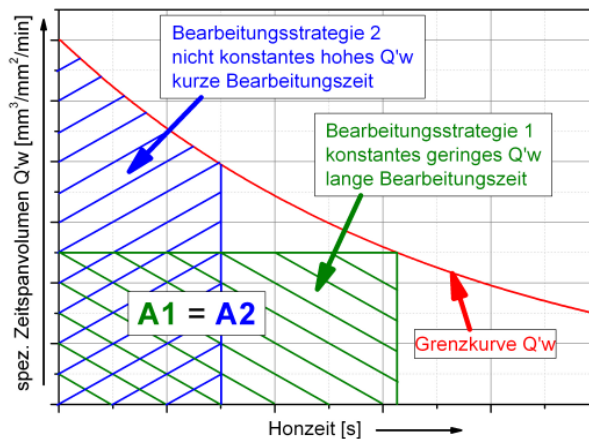
Zur Ermittlung der Sollkontur wurden serienmäßig mit Honbrille gefertigte Zylinderkurbelgehäuse vermessen. Die dabei ermittelten Formen der einzelnen Zylinderbohrungen wurden als zu fertigende Sollformen verwendet. Sowohl die Test- als auch eine Sollkontur sind in Bild 7 dargestellt.



*Bild 7: qualitative Darstellungen der Testkontur (links) und Sollkontur*

## 5.2 Bearbeitungsstrategie und –parameter

Die Kraft-Weg-Kennlinie von Aktoren beschreibt einen linearen Abfall von der Blockierkraft ohne Aktorauslenkung zum kraftlosen Leerhub. Daraus ergibt sich ein durch Versuche verifizierter und in Bild 8 dargestellter Verlauf des Q'w über der Honzeit. Die Entwicklung der Bearbeitungsstrategie erfolgte zuerst in Anlehnung an den konventionellen Honprozess, bei dem der Anpressdruck und das Q'w über einen weiten Bereich konstant gehalten werden. Daraus ergab sich Strategie 1, bei der eine schrittweise (hubabhängige) Erhöhung der Spannung für die Aktoransteuerung zugrunde gelegt ist. Die Strategie 2 zielt auf eine maximale Produktivität ab, wobei das volle Aktorikpotenzial über einer definierten Anzahl von Hüben genutzt wird. Bei der Versuchsdurchführung kam jeweils nur eine von den drei Schneidgruppen zum Einsatz.



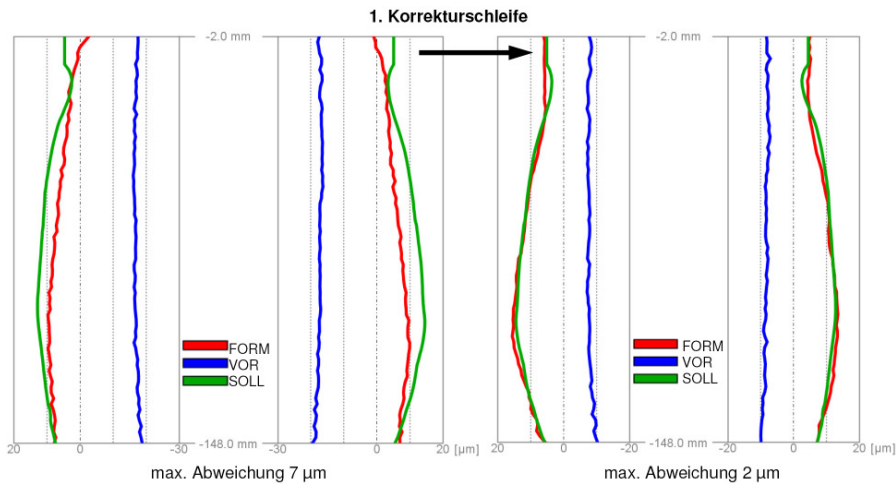
**Bild 8:** Bearbeitungsstrategien im Zusammenhang mit Q'w und Honzeit

### 5.3 Kennwertermittlung

Die Kennwertermittlung erfolgte durch die Auswertung zahlreicher Versuche sowohl mit den Test- als auch mit den Sollkonturen. Hauptaugenmerk lag stets auf der Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse. Nachstehend werden Aussagen zu den Kennwerten Formgenauigkeit, Oberflächentopografie und Produktivität getroffen.

#### *Formgenauigkeit*

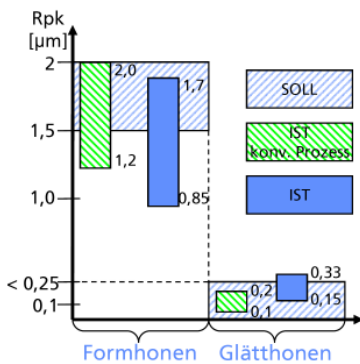
Formgenauigkeiten von  $\leq \pm 3 \mu\text{m}$  sowohl in radialer und als auch in axialer Richtung wurden bei den Test- und Sollkonturen in den Bereichen mit gleichen Eingriffsbedingungen erreicht. Ziel ist, die Genauigkeiten in allen Bereichen der erzeugten Makroform durch modellhafte Beschreibung im Technologiemodul und die Korrekturmöglichkeit über Soll-Ist-Vergleich zu erhöhen. In Bild 9 wird die Korrekturwirkung durch Axialschnittdarstellungen einer Bohrung verdeutlicht. Darin ist die vorgehonte Kontur (VOR), die formgehonte Kontur (FORM) und die Sollkontur (SOLL) jeweils für den Ausgangsversuch und den Versuch nach einer Korrekturverarbeitung dargestellt.



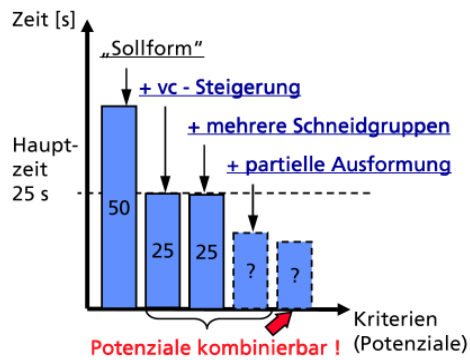
**Bild 9:** Axialschnittdarstellung der Honkonturen nach einer Korrekturschleife

**Oberflächentopografie**

Die bei der konventionellen Bearbeitung geforderte Oberflächentopografie ist durch das Formhonen mit adaptiven Werkzeug grundsätzlich darstellbar. Das geht aus Bild 10 exemplarisch für die reduzierte Spitzenhöhe Rpk hervor. Durch Variation der Bearbeitungsstrategie sind die Rauheitswerte auch gezielt beeinflussbar. Beim Einsatz des neu entwickelten Glätthonwerkzeuges können ebenfalls die Anforderungen an die Finishbearbeitung erfüllt werden.



**Bild 10:** Rauheitskennwert Rpk



**Bild 11:** Potenziale zur Produktivitätssteigerung

### *Produktivität*

Bei Anwendung der Strategie 2 ergibt sich gegenüber der Strategie 1 eine nahezu halbierte Bearbeitungszeit (vgl. Bild 8). Weiteres Potenzial für die Produktivitätssteigerung ergibt sich, wie aus Bild 11 ersichtlich, durch die Erhöhung der Schnittwerte, dem Einsatz mehrerer Schneidgruppen und der Anpassung der Bearbeitungsstrategie. Diese Möglichkeiten lassen sich zudem frei kombinieren mit dem Ergebnis, dass die geforderte Hauptzeit von 25 s erreicht werden kann.

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das adaptronische Formhonen als fertigungstechnischer Ansatz zum Erzeugen unrunder Bohrungen in Zylinderkurbelgehäusen dargestellt. Das adaptronische Formhонwerkzeug bietet die notwendigen Freiheitsgrade zum Erzeugen von Formen, die den Inverskonturen montage- und betriebsbedingter Verzugsformen entsprechen. Mit dem entwickelten Honverfahren ist der Honprozess darstellbar. Das erforderliche zu zerspanende Aufmaß wird durch eine winkel- und hubabhängige Zustellung der Honleisten mittels Piezoaktoren gewährleistet. Die Ermittlung und Bewertung von Produktivität, Formgenauigkeit und Oberflächentopografie lässt den Schluss zu, dass eine Substitution des konventionellen Basishonens durch das adaptronische Formhonen erfolgen kann. Der Einsatz einer Honbrille ist verzichtbar.

Für den Soll-Ist-Vergleich und die Ausgabe der Korrektur ist es notwendig, die erzeugte Form messtechnisch zu erfassen und zu bewerten sowie zulässige Abweichungen zu definieren. Das betrifft z.B. auch die Festlegung der Messebenen in Tiefenrichtung.

Durch das adaptronische Formhonen ist für das tribologische System Kolben, Kolbenring, Zylinderlaufbahn ein hohes Optimierungspotenzial darstellbar. Mit den erzeugbaren Makroformen ist eine betriebsbereichsabhängige Verbesserung der Zylinderform erreichbar womit die Passfähigkeit der Kolbenringe erhöht wird. Weiterhin kann eine Anpassung der Kolbenringsspannung wesentlich zur Reibungsminimierung beitragen.

Durch die abbildbaren verfahrenstechnischen Möglichkeiten können auch neue konstruktive Freiheitsgrade in der Antriebstechnik dargestellt werden, womit sich z.B. Leichtbaustrategien konsequent verfolgen lassen.

## **Literaturangaben**

- [1] Spitznagel, T.; Berberich, N.; Gabbert, U.: *Reduktion der Zylinderverzüge zur Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren - Eine numerische Potentialstudie, Berichtsband des 2. Automobiltechnischen Kolloquiums, Garching, 11.-12. April 2011, CD-ROM (ISBN: 978-3-942980-00-5).*
- [2] Kuhn, T.: *Messung der Zylinderverformung von Aluminiumkurbelgehäusen für Dieselmotoren. Hannover, Universität Hannover, Dissertation, 2001*
- [3] Busse, T.; Schultheiß, H.: *Verfahren zur Auswertung von Messdaten. Patentschrift Nr. DE102004057462A1, 01.06.2006*
- [4] Wiens, A.; Lahres, M.; Hoffmeister, H.-W.; Flores, G.: *Fertigungstechnischer Ansatz zur Kompensation von Zylinderverzügen mittels Formhonen. VDI-Berichte Nr. 2109, 2010, S. 133-145, VDI-Wissenforum GmbH, Düsseldorf*
- [5] Zurrin, R.: *Variables Formhonen durch rechnergestützte Honprozeßsteuerung. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Dissertation, 1990*

---

<sup>1</sup> Teilthema „Verfahrensentwicklung Formhonen“ aus dem Verbundvorhaben „Entwicklung neuer Fertigungskonzepte für ein formhaltiges Zylinderrohr für Zylinderkurbelgehäuse aus Grauguss“. Das Vorhaben (Projektnummer 12449/2041) wurde im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und mit Mitteln des Freistaates Sachsen gefördert.