

Fertigung von Zylinderköpfen für Großdieselmotoren unter Einsatz von MMS

Mit gebündeltem Know-how systematisch trockenlegen

Dank der Verknüpfung universitärer Forschung mit praxisorientiertem Know-how des Werkzeugherstellers gelang es der MTU Friedrichshafen, bei geringem Einführungsrisiko von den Vorteilen der MMS-Bearbeitung zu profitieren.

VON DIRK SELLMER, CHRISTOPH WELLNER, JOACHIM SCHUWERK UND SIEGFRIED SCHMALZRIED

→ Der Dieselmotorenhersteller MTU Friedrichshafen beschäftigt sich seit Mitte der 1990er Jahre mit dem Thema Trockenbearbeitung/Mindermengenschmierung (MMS). Die treibenden Faktoren waren höhere Produktivität, verbesserter Arbeitsschutz und niedrigere KSS-Kosten. Schnell zeigte sich, dass die Komplexität, Größe und Fertigungsphilosophie (Komplettbearbeitung in möglichst wenig Aufspannungen) der MTU-Bauteile die Einsatzmöglichkeiten für die neue Technologie begrenzen. Auch die relativ niedrigen Stückzahlen einer Kleinserienfertigung – verbunden mit einer hohen Bauteilvielfalt – bremsen die schnelle Umsetzung. Nach verschiedenen Versuchen an kleinen prismatischen Bauteilen (Steuerteilen) auf einem für umschaltbaren Nass- und MMS-Betrieb umgerüsteten BAZ des Typs ›Heller MC16‹ konzentrierte die MTU ihre Aktivitäten seit Anfang 2002 auf die Realisierung der MMS-Bearbeitung eines sogenannten ›Rennerteils‹. Dieses Teil mit entsprechend hohen Stückzahlen sollte die Auslastung für eine komplett umgebaute Maschine sicherstellen. Nach einer Potenzialanalyse wurde der Zylinderkopf der Motorbaureihe ›4000‹ ausgewählt.

Bei dem Zylinderkopf (Bild 1) handelt es sich um ein Bauteil aus Sondergussisen (GG26 mit erhöhtem Cr-Anteil) mitt-

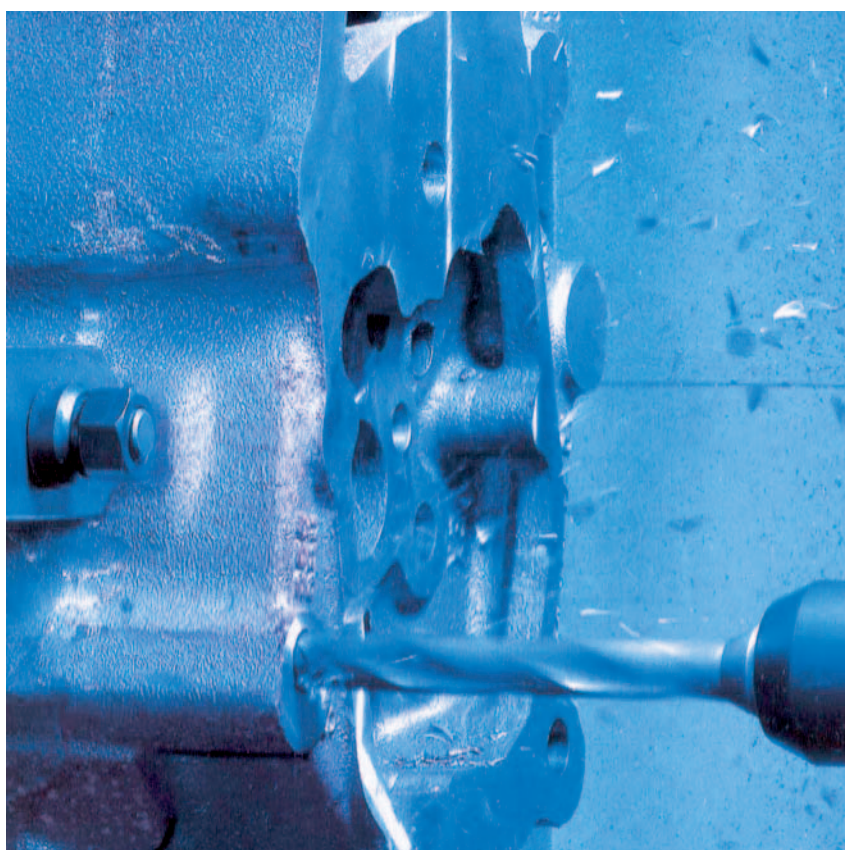
lerer Größe, das in fünf Spannungen auf unterschiedlichen BAZ gefertigt wird. Zunächst sollte der erste Arbeitsvorgang, die so genannte Oberseitenbearbeitung, trockengelegt werden. Bei dieser Bearbeitung kommen 28 Werkzeuge unterschiedlicher Verfahren (Fräsen, Bohren, Gewinden, Senken und Reiben) zum Einsatz, die in Summe eine Bearbeitungszeit von 15,4 Minuten beanspruchen.

Da eine Grundsatzuntersuchung zur Machbarkeit, hauptsächlich bedingt durch die Bauteilgröße, nicht mehr im Hause

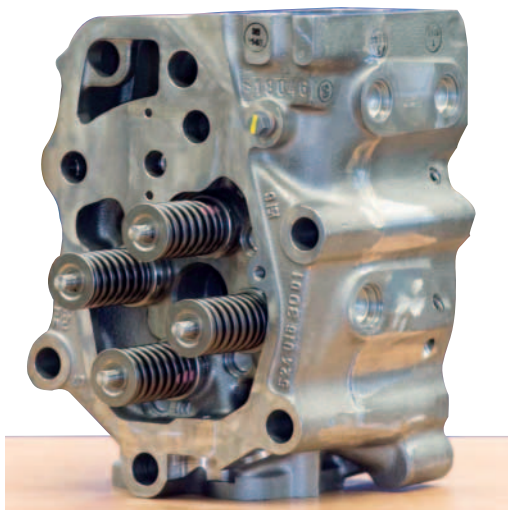
MTU auf der umgebauten Heller MC16 durchzuführen war, wurde ein Projekt mit einem externen Partner, dem Institut für Produktionstechnik wbk der Universität Karlsruhe, aufgesetzt. Das Institut verfügte durch diverse Vorarbeiten über entsprechendes Know-how auf diesem Gebiet.

Versuche zur Erarbeitung der technologischen Grundlagen

Ziel der Untersuchungen am wbk war es, die notwendigen technologischen Grundlagen für die Trockenbearbeitung eines Zy-



Bilder: MTU



1 Ausgewählt für die Umstellung auf Trocken-/MMS-Bearbeitung: Zylinderkopf der Motorbaureihe ›BR 4000‹

linderkopfes zu erarbeiten. Anhand exemplarischer Bearbeitungsschritte sollte eine grundsätzliche Machbarkeit der kompletten Trockenbearbeitung nachgewiesen werden. Ausgewählt wurden hierzu ein Wendeschneidplattenbohrer mit Pilot, ein Stufenbohrer, ein Gewindebohrer, ein Bohrfaswerkzeug, eine Reibahle und ein Tiefbohrer. Für die Prozesssicherheit ist vor allem der ungestörte Spanabtransport ohne das Fördermittel Kühlschmieremulsion entscheidend. In den Versuchsreihen wurde ausgehend von den Schnittparametern aus der Nassbearbeitung geprüft, ob mit den Nasswerkzeugen eine trockene Bearbeitung möglich ist. Jedes eingesetzte Nasswerkzeug wurde mit speziell auf die Trockenbearbeitung ausgerichteten Lösungen verschiedener Werkzeughersteller verglichen, um das Produktivitätspotenzial abzuschätzen. Bei übermäßigem Verschleiß von Werkzeugen wurde zusammen mit dem betroffenen Hersteller ein weiterer Verbesserungsschritt vorgenommen.

Aus den grundlegenden Versuchen leitete man Maßnahmen für die komplette Trockenbearbeitung des Zylinderkopfs ab. Eine Steigerung von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub konnte unter Laborbedingungen bei allen Werkzeugen erreicht

Start mit Nasswerkzeug und Nassparametern	Spontanes Werkzeugversagen	Übermäßiger Verschleiß	Standzeitaussage
Vorbohren Ventilführungssitz	Optimierter Pilot		
Vorbohren Gewinde Stufenbohrer	Beschichtung TiAlN		
Gewinde schneiden		Gleitschicht	
Bohrfaswerkzeug vorbohren Passung	Beschichtung TiAlN	Geradgenutet WZ	
Passung 14 N7			
Bohrung in dünnwandigen Querschnitt	Beschichtung TiAlN	Auswahl spiralisiert, gerade	

2 Werkzeugübersicht MMS-Grundsatzversuch mit Bohrwerkzeugen

werden. Dies ist aus Sicht der Trockenbearbeitung notwendig, um mehr Wärme über die Späne abführen zu können. Für Vollhartmetallwerkzeuge (VHM, Bild 2) ergab sich eine Schnittwertempfehlung v_c bis 150 m/min bei einem Vorschub bis zu $f = 0,4$ mm/U. Bei Wendeschneidplatten liegt die Schnittwertempfehlung v_c zwischen 180 und 300 m/min und bei einem Vorschub $f = 0,1$ bis 0,3 mm/U (abhängig von der Schneidplattengröße). Generell ist für die Trockenbearbeitung mindestens eine TiAlN-Beschichtung gefordert. Bezüglich der Werkzeuggeometrie sind vor allem bei VHM-Werkzeugen an den Schneiden eine Schneidkantenfase und eine Schneid-eckenverrundung äußerst vorteilhaft für die Schneidenstabilität.

Einfluss der Trockenbearbeitung auf die Prozesszeit

Nach den Grundlagenversuchen konnten die Zeiten für den Trocken- und Nassbearbeitungsprozess verglichen werden.

Es zeigte sich, dass auf Grund der höheren Schnittwerte im Trockenbearbeitungsprozess enormes Hauptzeitpotenzial steckt (Bild 3). Schon die Kleinserie (wbk 1) zeigte eine deutliche Verkürzung. In der zwei-

i ANWENDER

MTU Friedrichshafen GmbH
88045 Friedrichshafen
Tel. 0 75 41/90-0
Fax 0 75 41/90-50 00
→ www.mtu-online.de

ten Serie (wbk 2) wurde die Hauptzeit mit einem VHM-Bohrer an Stelle eines einschneidigen Wendeschneidplattenbohrers erneut verkürzt. Die Prozesssicherheit hängt von unterschiedlichen Parametern ab, zum Beispiel von der Bearbeitungsmaschine. Unter Umständen ist dadurch eine geringfügige Anpassung der Schnittwerte notwendig. Dies beeinflusst wiederum die Gesamtprozesszeit. Die dargestellten Ergebnisse erlauben jedoch den Schluss, dass sich die Hauptzeiten durch die Trockenbearbeitung verkürzen lassen.

Validierung der Bearbeitung am Zylinderkopf

Im nächsten Schritt wurde die Komplettbearbeitung einer Aufspannung im Zerspanlabor des wbk auf einem Hüller-Hille ›Trockenspecht T500‹ eingerichtet. Besonderer Fokus lag auf Werkzeugen, die wegen ihrer hohen Schnittgeschwindigkeiten das höchste Einsparpotenzial der Bearbeitungszeit versprachen. Die Komplettbearbeitung einer Aufspannung diente dem Nachweis, ob unter MMS eine maßhaltige und hochwertige Bearbeitung möglich ist. Weiterhin wurde untersucht, wie sich der Spanabtransport am kompletten >>>

i HERSTELLER

Mapal Dr. Kress KG, 73431 Aalen
Tel. 0 73 61/585-0
Fax 0 73 61/585-1 50
→ www.mapal.de

i INSTITUT

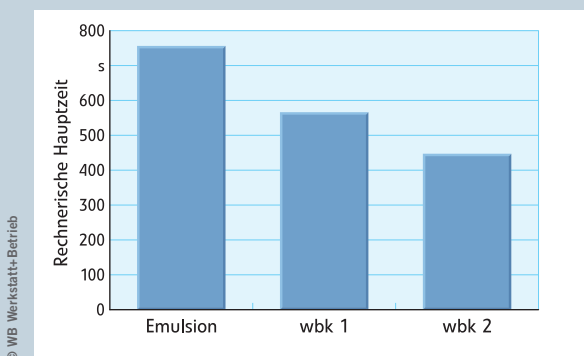
wbk – Institut für Produktionstechnik
Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe
Tel. 07 21/6 08-24 41/40 11
Fax 07 21/69 68 32
→ www.wbk-ka.de

» Bauteil darstellt und welchen Einfluss der Wärmeeintrag in das Bauteil auf die Fertigungsgenauigkeit hat.

Die Versuche zeigten, dass die Zylinderköpfe zunächst maßhaltig gefertigt werden können. Defizite ergaben sich bei der Bohrungsflucht. Das Bauteil hat sehr hohe Anforderungen in diesem Bereich. Auf Grund der höheren Vorschübe und der daraus resultierenden höheren Querkräfte können die geforderten Toleranzen wie im Nassprozess üblich nicht eingehalten werden. Dies führte zu einer interessanten Lösung für das am Hauptzeitanteil einflussreichste Werkzeug. Für die Schraubenbohrungen werden am Zylinderkopf sechs Bohrungen mit 23 mm Durchmesser und 100 mm Tiefe angebracht. Im Nassprozess wurde dieser Bearbeitungsschritt mit einem Wendeschneidplattenbohrer durchgeführt. Da der Verlauf im Trockenprozess zu hoch war, wurde dieser Bohrer durch einen VHM-Bohrer ersetzt. Dies führte im ersten Schritt nicht zu der gewünschten Qualität bezüglich des Verlaufs, jedoch konnte auf Grund der höheren Vorschübe und Schnittgeschwindigkeiten die Prozesszeit so stark verkürzt werden, dass ein nachfolgendes Aufbohren mit einem speziellen Aufbohrwerkzeug der Firma Lothmann (Bild 4) noch genügend Zeitratio ermöglicht, um wirtschaftlich zu arbeiten. Darüber hinaus erlaubt das Aufbohren die Einhaltung der Qualitätsanforderungen.

Zur Validierung des optimierten Prozesses für die Trockenbearbeitung erfolgte die Fertigung einer Serie von 40 Köpfen im Dauerlauf. Diese Köpfe wurden entsprechend den Qualitätskriterien der MTU abgenommen. Darüber hinaus wurden die Verschmutzung der Werkzeuge und der Maschine sowie die Auswirkungen der Wärmentwicklung überwacht. Im Verlauf

3 Vergleich des Hauptzeitpotenzials



Deutlich verkürzte Hauptzeiten dank höherer Schnittwerte im Trockenbearbeitungsprozess

der Serie zeigte es sich, dass gerade für Werkzeuge zur Fertigung hoher Oberflächengüten geeignete Konzepte zur Einbringung der MMS notwendig sind, um eine dauerhafte Verschmutzung der Werkzeuge zu verhindern.

Serienreife dank Mitwirkung des Werkzeugherstellers

Auf Basis der Grundlagenforschung des wbk erhielt Mapal den Auftrag, den Bearbeitungsprozess für die serienreife Fertigung (exemplarisch an 400 Werkstücken) bei der MTU zu optimieren. Ein wesentliches Ziel war, die Temperatur des Werkstücks während der Schruppprozesse Fräsen und Bohren nur wenig zu erhöhen ($Dt < 10^\circ$), damit die folgende Feinbearbeitung die geforderte Stichmaßgenauigkeit erreichen kann. Hierfür ersetzte man negative Keramikfräser durch positive hartmetallbestückte Fräser mit hohen Zähnezahlen. Durch die MMS wurde die Bearbeitungszeit bei gleich bleibender Qualität um rund 30 Prozent verkürzt.

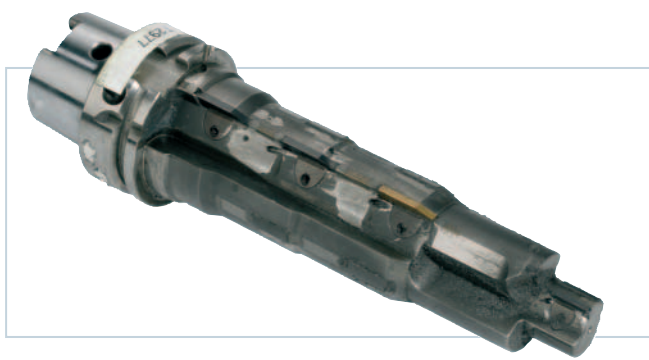
Spezifische Probleme der MMS-Technik ergaben sich insbesondere bei der Feinbe-

arbeitung der Bohrungen. Dabei war die Bearbeitung einstufiger Bohrungen mit Mapal-Einschneidern problemlos. Mit der bestehenden 4-stufigen Mittelbohrungsreihahle für die Nassbearbeitung (Bild 5) wurden die geforderten Qualitätsmerkmale bei Oberfläche und Durchmesser jedoch nicht erreicht. Einerseits reichte die Ölversorgung der vorderen Stufen des Werkzeugs nicht aus. Andererseits lagerten sich erhebliche Mengen Staub und Schmutz an den Führungsleisten an.

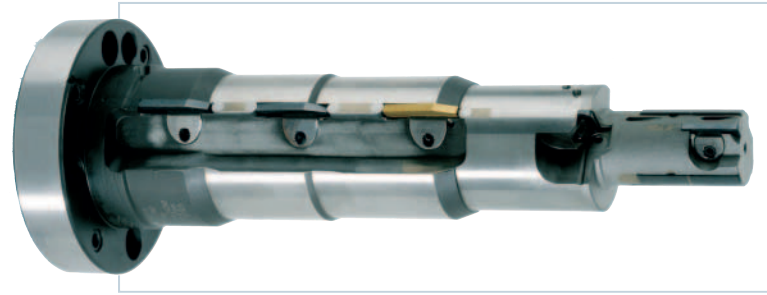
Um diese Probleme zu lösen, entwickelte man eine neue Variante der Reihahle mit spezifischer MMS-Einkanal-Ausführung (Bild 6). Im Inneren wurde das Feinbohrwerkzeug durch MMS-gerechte Kanalführung mit weniger Austrittsbohrungen und angepasste Querschnittskonstruktionen optimiert. Hierdurch wurde die Austrittsfläche reduziert und in jedem Querschnitt optimale Strömungsbedingungen hergestellt. Diese Konstellation erlaubt die geeignete Versorgung wesentlicher Schmierstellen an den Leisten. Die zentrale Führung des Werkzeugs befindet sich am vorderen Ende der Bohrung.



4 Spezielles Aufbohrwerkzeug des Herstellers Lothmann



5 Mit der Mittelbohrungsreihahle in der KSS-Version lassen sich die geforderten Qualitäten bei Oberfläche und Durchmesser nicht erreichen



6 Mittelbohrungsreibahle in der MMS-Version mit MMS-gerechter Kanalführung und angepassten Querschnittskonstruktionen

Zudem musste die Verschmutzung der Feinbohrwerkzeuge bei hohen Serienstückzahlen reduziert werden. Um zu verhindern, dass sich Schmutz zwischen Werkzeugkörper und Bohrungswand absetzt, was die Oberflächenqualität beeinträchtigt und den Werkzeugverschleiß erhöht, vergrößerte man zunächst den Überstand zur Bohrungswand. Außerdem wurde die Werkzeugoberfläche geschliffen, um die Haftung von Schmutzpartikeln zu verhindern. Die Kontamination der hinteren Stufen wirkt sich nicht auf das Ergebnis aus, weil bei der MMS-Variante keine Leisten vorhanden sind und der Körperüberstand auf 1 mm erhöht wurde.

Bei Mapal wurde im Ergebnis eine größere Zahl von Zylinderköpfen (400 Stück) unter Quasi-Serienbedingungen erfolgreich unter MMS bearbeitet. Die Bauteile wurden einer gesonderten Qualitätssicherung unterzogen und sind in die Serienproduktion der MTU eingeflossen. Dadurch konnte bewiesen werden, dass die Prozessstabilität und Qualität der MMS-Bearbeitung nicht nur unter Laborbedingungen gewährleistet sind.

Karl Kollmuß, Fertigungsleiter der MTU Friedrichshafen, zieht eine überaus positive Bilanz aus der Kooperation: »Das Projekt zur MMS-Bearbeitung am Zylinderkopf der Baureihe 4000 hat gezeigt, dass eine zielgerichtete Verknüpfung universitärer Forschung mit praxisorientierter Lieferantenunterstützung zu eindrucksvollen Ergebnissen führte. Dadurch konnte das Einführungsrisiko bei der MTU auf ein Mindestmaß gesenkt werden.«

In Fortführung des Projekts wird noch 2006 ein Heller-BAZ in der Serienfertigung der Zylinderköpfe BR4000 auf MMS-Betrieb mit einem Gerät der Firma Vogel umgerüstet und der Serienstart im Hause MTU vollzogen. ■ [www](http://www.mtu-online.com) → **WB101599**

Dipl.-Ing. Dirk Sellmer ist Leiter Versuch und Entwicklung bei der Mapal Dr. Kress KG in Aalen → dirk.sellmer@de.mapal.com

Dipl.-Ing. (TU) Christoph Wellner ist Leiter Verbesserungsprozess, Fertigungstechnik und Betriebsmittelorganisation bei der MTU Friedrichshafen GmbH → christoph.wellner@mtu-online.com

Dipl.-Ing. (FH) Joachim Schuwerk ist Projektleiter Fertigungs- und Verfahrenstechnik bei der MTU Friedrichshafen GmbH → joachim.schuwerk@mtu-online.com

Dipl.-Ing. Siegfried Schmalzried ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe → siegfried.schmalzried@wbk.uka.de