



Volumetrische Kompensation von hochpräzisen 6-Achs Schleifmaschinen

# Neue Dimensionen beim Turbinenbau

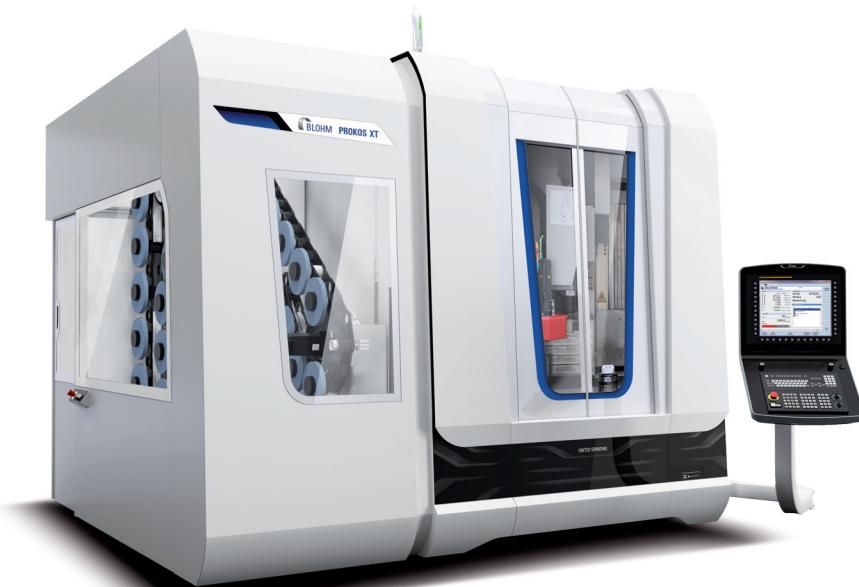
Mit der mehrachsigen Schleifmaschine PROKOS XT nimmt Blohm Jung gleichzeitig Komplexität, Flexibilität und Qualitätsfragen in der modernen Fertigung in Angriff. Eine der größten Herausforderungen beim Betrieb dieser mehrachsigen Maschine ist die Einhaltung der volumetrischen Genauigkeit von  $\pm 25$  Mikrometer. Zu diesem Zweck hat Blohm Jung sein für konventionelle 5-Achs Maschinen entwickeltes volumetrisches Kompensationsverfahren auf eine 6-Achs Version erweitert. Das neue Verfahren minimiert geometrische Fehler an allen sechs PROKOS XT Achsen. Für die Entwicklung dieses Verfahrens wurde IBS Precision Engineering um Unterstützung mit Hilfe des Rotary Inspectors gebeten, eines speziellen drahtlosen Sensor Systems zur Messung der drei Drehachsen. Als Produkteinführungskunde von Blohm Jung nutzt MTU Aero Engines die Kompensations-Software für mehrere PROKOS-XT-Maschinen bei der Bearbeitung von Turbinenkomponenten am Standort München.



Die Turbinenfertigung bei MTU ist ein hochkomplexer, hochpräziser Prozess, der echtes 6-Achs Schleifen erfordert.

immer höher werden. Typischerweise wird die Genauigkeit im zweistelligen Mikrometerbereich angegeben. Darüber hinaus ist Flexibilität ein dominantes Merkmal der modernen oder intelligenten Fertigung. Dies betrifft z.B. Kleinserienfertigungen mit hohem Produktionsmix oder sogar One-Piece-Flow Produktion und häufige Produktwechsel. Eine der Folgen ist, dass ähnliche Produkte und verschiedene Teile eines Pro-

dukts oder einer Produktfamilie auf verschiedenen Maschinen bearbeitet werden, aber die gleichen Spezifikationen einhalten müssen, was zu einer gleichbleibenden Qualität führt und eine maschinenunabhängige Werkstückzuordnung ermöglicht. Zusammengenommen erfordern diese Herausforderungen ein Qualifikationsverfahren, das Präzision beim Betrieb mehrerer Maschinen gewährleistet.



BLOHM PROKOS XT 6-Achs-Schleifzentrum.

Komplexität und Präzision sind zwei der größten Herausforderungen der modernen Fertigung, nicht nur bei den Produkten, sondern auch im Maschinen-Design, da die Anforderungen an die Genauigkeit der bearbeiteten Produkte





Bei MTU Aero Engines ist beispielsweise die Turbinenfertigung ein hochkomplexer, hochpräziser Prozess, der echtes 6-Achs Schleifen erfordert.

### Volumetrische Genauigkeit

PROKOS XT ist eine Neuheit im BLOHM-Portfolio von Flach- und Profilschleifmaschinen. Dieses 6-achsige Schleifzentrum wurde für die automatisierte Bearbeitung komplexer Werkstücke entwickelt und kann neben dem Schleifen auch Bohr- und Fräseroperationen ausführen. Die Ergänzung um eine sechste Achse wurde konzipiert, um die Bearbeitung komplexer Produkte in einem Arbeitsgang ohne Umrüstung der Aufspannung zu ermöglichen.

Achsen einer (Schleif-)Maschine haben zwangsläufig geometrische Fehler, die durch Herstellung und Montage der Maschine selbst, Verschleiß während ihrer Lebensdauer (Spiel oder Lagerprobleme) und Umwelteinflüsse im Betrieb entstehen. Zu den Fehlern gehören Radial-, Tangential- und Kippfehler in den Drehachsen und Führungsfehler in den Linearachsen. Blohm Jung hat ein volumetrisches Kompensationsverfahren entwickelt, um diese Fehler über die Steuerungssoftware zu minimieren und eine maximale volumetrische Genauigkeit im Zusammenspiel aller Achsen zu erreichen. Dieser Prozess verwendet die Siemens VCS-Software (Volumetrische Kompensationssystem-Software), um Kompensationsfunktionen auf die SINUMERIK-Maschinensteuerung anzuwenden.

Das volumetrische Kompensationsverfahren wird bereits seit einigen Jahren erfolgreich bei 5-achsigen Werkzeugmaschinen eingesetzt. Nach der Installation einer Werkzeugmaschine werden alle Freiheitsgrade aller Achsen präzise gemessen. Für die aufgetretenen und in der Maschinensteuerung gespeicherten geometrischen Fehler werden Kompensationswerte ermittelt. Wenn die VCS-Softwarefunktion in der Steuerung aktiviert ist, verwendet sie diese Werte zur Kompensation der Fehler und zur Verbesserung der Maschinenpräzision. Dieser Vorgang kann während der betrieblichen Nutzungsdauer einer Maschine wiederholt werden.



Rotary Inspector Hardware:  
der Trinity-Messkopf und die  
Masterkugel (dargestellt auf einer  
EROWA-Halterung).

### Eine Premiere bei 6-achsigen Maschinen

Die Anwendung des volumetrischen Kompensationsverfahrens auf die 6-achsige PROKOS-XT-Maschine war jedoch neu für Blohm Jung und brachte zwei Herausforderungen; die Erfassung der Fehlerdaten und Entwicklung der Algorithmen zur Umwandlung dieser Daten in Kompensationseinstellungen für die Maschine. Bei geeigneten Messsystemen zur präzisen Erfassung von Fehlerdaten wurde für die Linearachsen eine einfache Lösung gewählt; ein Lasermesssystem, das in der Lage ist, Fehler in sechs Frei-

heitsgraden entlang einer Linearachse zu messen. Für die Vermessung der drei Drehachsen gab es jedoch keinen Präzedenzfall. Dazu hat MTU Blohm Jung in die Rotary Inspector Lösung von IBS Precision Engineering eingeführt, die die tatsächliche Positioniergenauigkeit eines Werkzeugs gegenüber dem Werkstück bei (normalerweise) 5-achsigen Maschinen unter dynamischen Bedingungen bestätigen kann. Nach dem Vorbild des normalen Betriebs einer Maschine kann der Rotary Inspector die volumetrische Genauigkeit aller Bearbeitungssachsen überprüfen, wenn sie sich simultan bewegen.

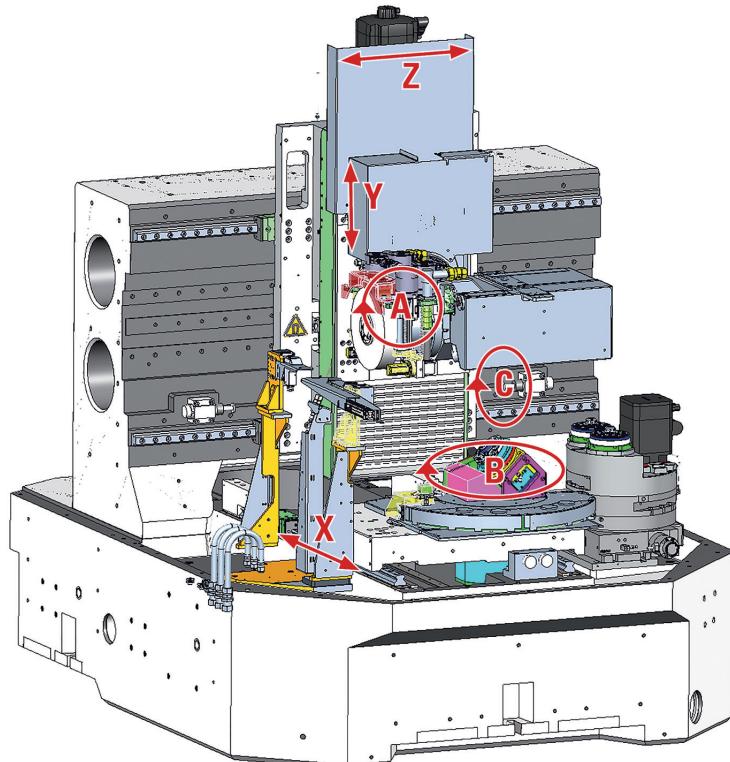
### Rotary Inspector

IBS hatte den Rotary Inspector entwickelt, um kritische geometrische und dynamische Leistungsparameter von 5-achsigen Maschinen zu bestimmen und zu korrigieren. Basierend auf Messungen nach der ISO 10791-6 kann die Messsoftware des Rotary Inspector die Genauigkeit der gesamten 5-achsigen Werkzeugmaschine innerhalb von Minuten bestimmen und auch den Drehachsenversatz und Rechtwinkligkeitsfehler berechnen. Umfangreiche Messergebnisse können in zwei Kennzahlen zusammengefasst werden; der Q-Wert als maximaler geometrischer Fehler, der eine obere Grenze für die Maßhaltigkeit bildet, und der P-Wert als größter dynamischer Fehler, der die Oberflächengüte darstellt. Der Rotary Inspector beinhaltet einen Trinity-Funkmesskopf, der in der Spindel platziert wird, und eine Masterkugel, die mit einer optionalen EROWA-Halterung zur genauen Positionierung auf dem Produkttisch platziert werden kann.

### Koordinatenumrechnungen

Die größte Herausforderung bei der Entwicklung der 6-Achs Anwendung war nicht nur die Vermessung aller 6 Achsen, sondern auch die Interpretation der Messergebnisse und deren Umsetzung in Kompensationswerte, die ein gründliches Verständnis der Konstruktion der Maschine erfordert. Der Rotary Inspector umfasst insgesamt 21 standardmäßige 5-achsige Maschinentypen, bzw. Konfigurationen. Dies war die erste Anwendung des Rotary Inspector zur Vermessung einer 6-achsigen Maschine.





Schema der 6-achsigen PROKOS-XT-Maschine mit den drei Linearachsen (X, Y und Z) und den drei Drehachsen (A, B und C).

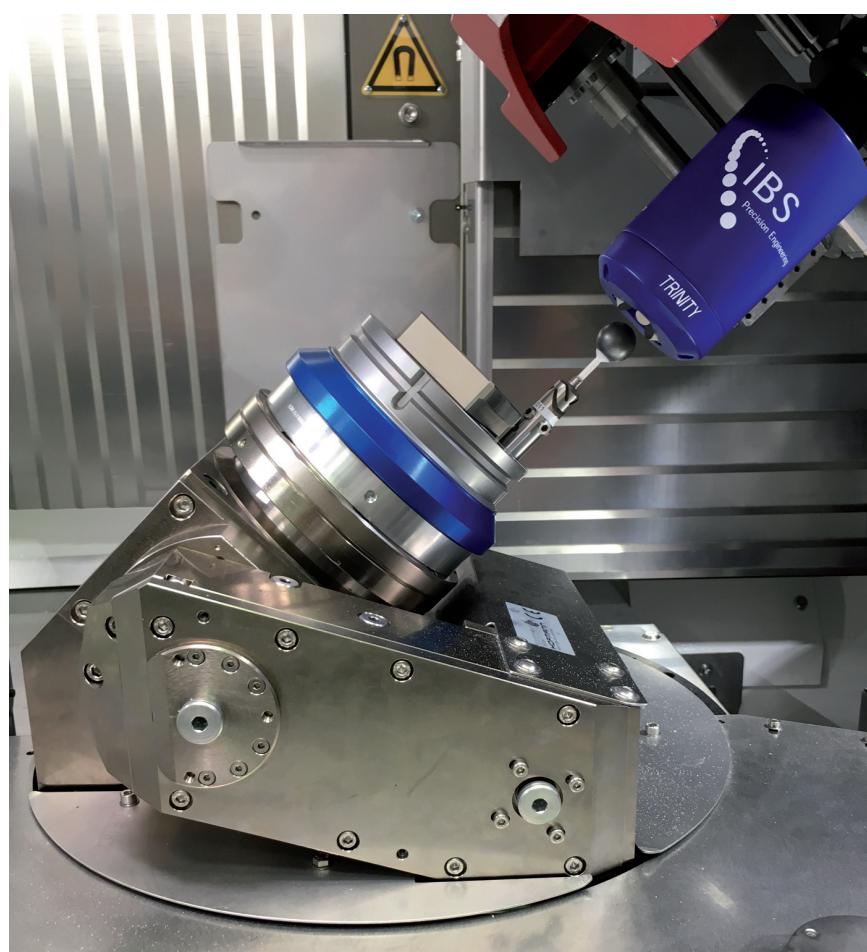
Die PROKOS-XT-Konfiguration verfügt über drei Linearachsen (X, Y und Z) und drei Drehachsen (A, B und C); sie kann sie als 5-achsige Maschine mit einer zusätzlichen Kippachse (C) betrachtet werden, die mit einem Neigungswinkel von  $45^\circ$  auf der B-Achse sitzt. Dies erhöht natürlich die Komplexität der Definition der erforderlichen Koordinatenrechnungen. Im Messkopfkoordinatensystem gemessene Fehler müssen in Maschinenkoordinatenfehler (z.B. Rechtwinkligkeits- und Positionsfehler der Drehachsen) umgewandelt und anschließend in eine Optimierung der kinematischen Kette in der Maschine umgesetzt werden.

Eine zusätzliche Herausforderung stellte die Beschaffenheit der Maschine dar. Die PROKOS XT verwendet ein voluminöses Schleifwerkzeug, das auf einer kurzen Spindel montiert ist, im Gegensatz zu herkömmlichen Fräsmaschinen, die ein schlankes Werkzeug auf einer langen Spindel montiert haben. Das bedeutet, dass bei dieser 6-achsigen Maschine die verschiedenen Linear- und Drehachsen einen begrenzten Bereich haben und nicht alle Standard-Bewegungsabläufe zugänglich sind, da der Messkopf unter bestimmten Bedingun-

gen mit dem Rundschalttisch und dem Werkstückträger kollidieren könnte. Daher müssen einige der Messungen in von der Norm abweichenden Situationen durchgeführt werden.

### ISO-Philosophie

Bei der Formulierung des Rotary Inspector wurde der PROKOS XT durch die Kombination von zwei 5-Achsen-Typen definiert, die am ehesten die 6-achsige darstellen. Das Messverfahren kombiniert dann die Standardprüfungen für diese beiden Typen, die die A- und B- bzw. die A- und C-Achse umfassen, und endet mit einem umfassenden ABC-Test. Basierend auf der Begründung der Norm ISO 10791-6 (Prüfbedingungen für Bearbeitungszentren - Genauigkeit der Vorschübe, Drehzahlen und Interpolationen) wurden die verschiedenen Elemente dieser Prüfung, wie z.B. eine Drehachse, die sich mit doppelter Geschwindigkeit der anderen Achse bewegt, oder eine Achse, die sich in positive Richtung bewegt und die andere in negative

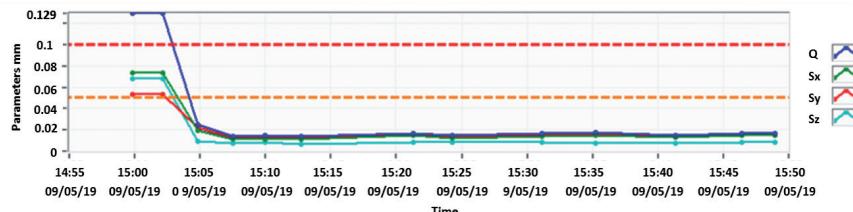


Die erste Anwendung des Rotary Inspector zur Vermessung einer 6-achsigen Maschine.



Richtung, in den 6-Achs Test integriert. Dies macht den 6-Achs Test nicht „ISO-zertifiziert“, da es keine 6-achsige ISO-Norm gibt, aber er stellt den besten Ansatz nach der ISO-Philosophie dar. Damit wurde ein wichtiger Schritt zur zuverlässigen Qualifizierung von 6-achsigen Maschinen getan.

(17919-319)



Typische Ausgabe des Rotary Inspector, die die Entwicklung der Q- und P-Werte während der Kalibrierung zeigt, d. h. den maximalen geometrischen Fehler, der eine obere Grenze für die Maßhaltigkeit liefert, und den größten dynamischen Fehler, der die Oberflächenbeschaffenheit darstellt.

### Blohm Jung: Alleinstellungsmerkmal

“MTU Aero Engines war unser Produkteinführungskunde für die 6-achsigen PROKOS-XT-Maschinen. Sie waren bereits mit der Rundachsen-Inspektor-Lösung des niederländischen Spezialisten für Werkzeugmaschinenmesstechnik vertraut; IBS Precision Engineering. MTU stellte uns die Firma IBS vor und wir beschlossen, gemeinsam mit IBS den Rundachsen-Inspektor in den volumetrischen Kompensationsprozess des VCS zu integrieren.

“Mit Hilfe des neuen VCS-Verfahrens von Blohm Jung können Kunden 6-achsige Schleifmaschinen flexibel für die Herstellung verschiedener Produkte und von Teilen von Produktfamilien einsetzen. Jetzt können sie nicht nur die volumetrische Genauigkeit ihrer Maschine mit dem VCS verbessern, sondern auch die Vergleichbarkeit und Konsistenz zwischen verschiedenen Maschinen, sowie eine hohe technologische Verfügbarkeit bei konstanter Werkstückqualität sicherstellen.

“Derzeit ist das VCS ein Alleinstellungsmerkmal von Blohm Jung. Durch die Integration der volumetrischen Kompensation in unser Leistungsangebot wollen wir unsere Position im High-End-Markt für Schleifen und Profilieren weiter stärken; so sind beispielsweise die Überprüfung der volumetrischen Genauigkeit und die Anwendung der erforderlichen Kompensation integraler Bestandteil der Wartungsintervalle. Außerdem wird das VCS von Fall zu Fall anderen Produkten in unserem Portfolio hinzugefügt.”

Matthias Guhlke, Senior Key Account Manager Turbine bei Blohm Jung, Hamburg

### MTU: Der Schritt von 5 zu 6 Achsen

“Unsere Abteilung ist bei MTU in München für die Wartung und Instandhaltung von Werkzeugmaschinen zuständig. Dazu gehört auch die Kalibrierung, bei der wir seit zwei Jahren mit den Werkzeugen Rundachsen-Inspektor und Spindel-Inspektor von IBS arbeiten. Bei einer vollständigen kinematischen Kalibrierung ist meiner Meinung nach nichts vergleichbar mit dem Rundachsen-Inspektor.

“Heute erfordert die komplexe Geometrie von Werkstücken eine 6-achsige Schleifmaschine und dafür brauchten wir ein 6-achsiges Kalibrierungsverfahren, um eine 25-Mikron-Genauigkeit für das gesamte Arbeitsgebiet einer Maschine zu gewährleisten. Da diese noch nicht als Standardanwendung verfügbar war, mussten wir in Zusammenarbeit mit dem Maschinenbauer Blohm Jung, dem Maschinensteuerungslieferanten Siemens und dem Messtechnikexperten IBS ein eigenes Verfahren entwickeln.

“Unsere Mitarbeiter testen ihre Maschinen regelmäßig mit einfachen Messsternen. Wenn sich Abweichungen wie Vibratoren oder falschen Parametereinstellungen zeigen, führen unsere Messtechniker ein volumetrisches VCS-Kompensationsverfahren durch. Sie verwenden einen Renishaw-XM60-Laser, um die Geradheit und Orthogonalität der Linearachsen zu überprüfen, und den Rundachsen-Inspektor, um die Kinematik aller sechs Achsen zu überprüfen - IBS schulte unsere Ingenieure im effektiven Arbeiten mit dem Rundachsen-Inspektor.

“Derzeit haben wir drei 6-achsige Schleifmaschinen in Betrieb und eine vierte und fünfte sind unterwegs. Dank des VCS-Verfahrens von Blohm Jung mit dem Rundachsen-Inspektor von IBS können wir auf all diesen Maschinen Produkte mit gleichbleibend hoher Qualität und Präzision herstellen.”

Matthias Scherm, Plant Services-Engineering bei MTU Aero Engines, München

### IBS: Vertrauen zur Maschine

“Maschinenbauer und Anwender können unsere Rotary Inspector Lösung zur Qualifizierung ihrer Maschine und zur Durchführung von Abnahmeprüfungen einsetzen. Sein einzigartiger Vorteil ist, dass der Trinity-Messkopf buchstäblich auf der Maschine sitzt und alle Bewegungen ausführt, die bei der Live-Bearbeitung auftreten - und im Falle des PROKOS-XT-Betriebs bei MTU sind es tatsächlich die sechs Achsen, die sich gleichzeitig bewegen. Lasermessplätze erlauben diese Art der dynamischen Messung nicht.

Die Messung ist in Minuten abgeschlossen und das Verfahren kann regelmäßig, z.B. wöchentlich oder monatlich, aber auch ad hoc, je nach Arbeitsbelastung oder nach einem Crash durchgeführt werden, um zu überprüfen, ob etwas mit den Maschineneinstellungen oder der Geometrie passiert ist.

“Da der Rotary Inspector alle sechs Achsen unter Betriebsbedingungen abdeckt, gibt die Kalibrierung dem Benutzer Vertrauen in seiner Maschine. Er weiß, dass er seiner Maschine vertrauen kann; sie liegt innerhalb der Spezifikation bezüglich der volumetrischen Genauigkeit und die Maschinensteuerung tut, was sie tun soll.”

“Als Siemens Product Partner arbeitet IBS mit Siemens zusammen, um die Messkompetenz des Rotary Inspector mit deren Maschinenkompensationssoftware zu bündeln. Wir haben uns sehr gefreut, Blohm Jung und damit MTU bei der Einführung ihrer wegweisenden Maschine zu unterstützen.”

Theresa Spaan-Burke, Innovation Director, und Joris Janssenswillen, System Engineer, bei IBS Precision Engineering, Eindhoven