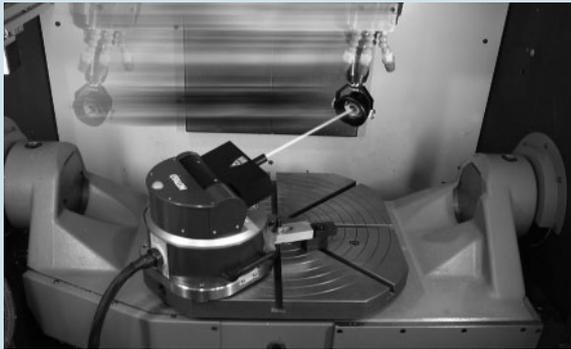


# Kinematische Kalibrierung von 5-Achs Werkzeugmaschinen mit LaserTracern

R. Schmitt, P. Jatzkowski,  
H. Schwenke



## Kurze Einführung in die Thematik

Der deutsche Werkzeugmaschinenbau hat international eine herausragende Stellung und bildet einen wichtigen Beitrag zur industriellen Produktion. Mit dem LaserTracer, einem selbstnachfolgenden Laserinterferometer, können Werkzeugmaschinen schnell, einfach und präzise kalibriert werden. In einem Forschungsprojekt, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert wird, haben die Firma Etalon und das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen die Kalibrierung mittels LaserTracern durch ein Verfahren zur kinematischen Messung bei bewegter Maschine beschleunigt und gleichzeitig um die Möglichkeit zur Kalibrierung von bis zu zwei zusätzlichen Drehachsen erweitert. Ziel ist die Kalibrierung einer 5-Achs-Werkzeugmaschine mit einem einzigen Messsystem innerhalb weniger Stunden durchzuführen.

## 1 Das Projekt PK-Mult

Werkzeugmaschinen bilden einen Grundpfeiler der industriellen Produktion und kommen bei der Herstellung unzähliger Produkte zum Einsatz. Obwohl das Werkzeug mittels präzise geregelter Antriebe positioniert wird, unterliegt jede Werkzeugmaschine herstellungsbedingten Unzulänglichkeiten wie z.B. Formfehlern der Führungen sowie temperatur- und kräftebedingten Formabweichungen, die zu einer Positionsunsicherheit des Werkzeugs führen. Diese fehlerhafte Positionierung führt unmittelbar

zu einer Abweichung des Werkstücks von seiner Sollgeometrie.

Eine Möglichkeit zur Kompensation der Positionsunsicherheit ist die Messung der Abweichungen (Kalibrierung) und die anschließende Korrektur der Maschinenbewegung. Diese müssen bei der Inbetriebnahme durch den Hersteller und in regelmäßigen Abständen beim Betrieb der Werkzeugmaschine wiederholt werden. Die Messungen verursachen Stillstandszeiten, die beim Hersteller zu Kosten durch eine Verzögerung der Abnahme und beim Betreiber zu Produktionsausfällen führen. Konventionelle Kalibrierverfahren sind sehr zeitaufwändig und stoßen besonders bei großen Maschinenkinematiken an ihre Grenzen. Zudem existiert kein Messverfahren, mit dem sämtliche Abweichungen einer 5-Achs-Werkzeugmaschine erfasst werden können.

Am Werkzeugmaschinenlabor WZL wurde daher mit der Firma Etalon im Projekt PK-Mult (Parametrische Kalibrierung von Werkzeugmaschinen mittels Multilateration) das innovative Verfahren der Kalibrierung von Werkzeugmaschinen mit LaserTracern um eine Möglichkeit zur Kalibrierung von Drehachsen erweitert und durch eine Messung bei bewegter Maschine beschleunigt. Mit Abschluss des Projekts PK-Mult werden die Voraussetzungen geschaffen, eine 5-Achs-Werkzeugmaschine komplett zu kalibrieren. Durch die Messung bei bewegter Maschine wurde die Messzeit signifikant reduziert, so dass Stillstandszeiten verkürzt und somit Kalibrierkosten für die Hersteller und Betreiber von Werkzeugmaschinen reduziert werden konnten.

## 2 Das Modell der Werkzeugmaschine

Die am weitesten verbreitete Maschinenkinematik besteht aus drei aufeinander aufgebauten Achsen, anhand derer ein Werkzeug in einem kartesischen Koordinatensystem bewegt werden kann. In vielen Fällen wird diese Kinematik durch zwei Drehachsen zum Schwenken des Werkstücks oder des Werkzeugs ergänzt (Abb. 1). [1]

Aufgrund der Komplexität von Werkzeugmaschinen basiert die Korrektur von Werkzeugmaschinen auf einem vereinfachten Modell. Jeder Achse werden sechs Freiheitsgrade zugewiesen, innerhalb derer eine fehlerhafte Positionierung möglich ist (Abb. 2). Die Abweichung der Rechtwinkligkeit der Achsen zueinander kann als konstanter Anteil eines rotatorischen Fehlers interpretiert werden, so dass einer Drei-Achs-Maschine mit 18 Parametern vollständig beschrieben werden kann.

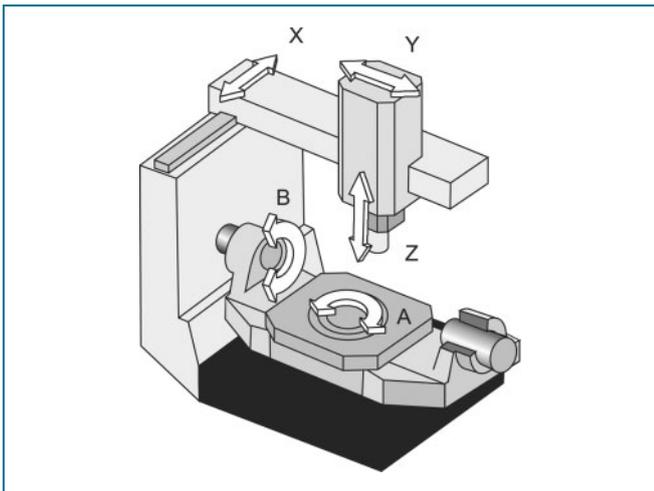


Abb. 1: Kinematik einer Werkzeugmaschine mit 3 linearen Achsen und 2 Drehachsen

Durch die zusätzlichen Drehachsen kommen weitere 6 Freiheitsgrade je Achse hinzu. Bei einer Überlagerung der Linear- und Drehbewegungen muss zudem die Position der rotatorischen Achsen im Werkzeugmaschinenkoordinatensystem bekannt sein, so dass pro Achse zwei zusätzliche Freiheitsgrade hinzu kommen. In Summe wird eine 5-Achs-Werkzeugmaschine durch 34 Fehlerparameter im Modell abgebildet.

### 3 Kalibrierung von 5-Achs Werkzeugmaschinen mit LaserTracern

Konventionell werden Werkzeugmaschinen in der Praxis mittels Laserinterferometern und Koordinatenmessgeräte mit geometrischen Normalen kalibriert. Der Nachteil der Verfahren ist, dass sie sehr zeitaufwändig sind und die Messungen nur von geschultem Personal durchgeführt werden können. An die Grenzen stoßen diese Systeme insbesondere bei der Kalibrierung großer Werkzeugmaschinen und Koordinatenmessgeräte mit Verfahrenachsen über einem Meter, da dann geometrische Normale ausreichender Präzision technisch nicht mehr realisiert werden können. Konventionelle laserbasierte Verfahren weisen insbe-

sondere in der Geradheitsmessung langer Maschinenachsen große Unsicherheiten auf [7].

Aufgrund der Defizite der konventionellen Verfahren wurde an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem National Physical Laboratory in England (NPL) ein neues Verfahren zur Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und Koordinatenmessgeräten (KMGs) entwickelt. [3] Dieses innovative Verfahren basiert auf dem Einsatz des LaserTracers, einem Laserinterferometer, das selbstständig einem maschinengeführten Reflektor folgt.

Der LaserTracer (to trace = verfolgen) unterscheidet sich von dem bekannteren Lasertracker durch sein stabileres optisches Zentrum und seine spezielle Auslegung für die Kalibrierung von Werkzeugmaschinen: Gemessen wird nur die Längenänderung. Eine Messung der Winkel ist im Gegensatz zum konventionellen Lasertracker nicht vorgesehen, da die optische Winkelmessung unter industriellen Umgebungsbedingungen prinzipbedingt mit einer großen Unsicherheit behaftet ist. [6].

Das hochpräzise optische Zentrum des LaserTracers mit einer Positionsunsicherheit von weniger als  $0,1 \mu\text{m}$  basiert auf einem patentierten Verfahren [5]. Im Inneren ist eine hochpräzise Reflektorkugel mit Formabweichungen unter  $50 \text{ nm}$  auf einem temperaturstabilen Invarstab befestigt, die als Referenzspiegel für das Interferometer dient (Abb. 3). Sie ist mechanisch und thermisch von dem Nachführmechanismus entkoppelt und bleibt so auch während der Bewegung im Submikrometerbereich stabil. [6].

Für die Maschinenkalibrierung wird der Reflektor in den Werkzeughalter eingesetzt und der Abstand zum Drehzentrum des Interferometers an einer großen Anzahl von Punkten im Arbeitsraum bestimmt (Abb. 4). Anschließend wird der LaserTracer in vier bis sechs weitere Positionen gebracht und die Messung wiederholt. Mit Hilfe der Längsinformationen und einem geometrischen Modell der Werkzeugmaschine können die statischen Führungsfehler nach dem Best-Fit Verfahren berechnet werden. [4]

Bei der Kalibrierung von Drehachsen wird der Abstand zum Reflektor in vier verschiedenen Positionen gemessen, während die Rotationsachse jeweils eine komplette Drehung durchläuft (Abb. 5).

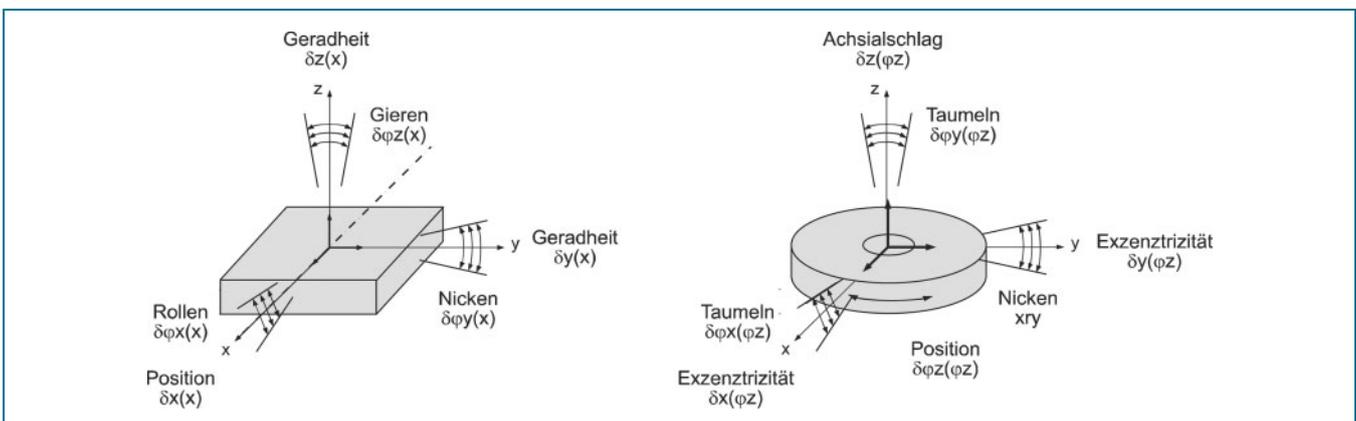


Abb. 2: Abweichungsparameter einer linearen Achse [1]

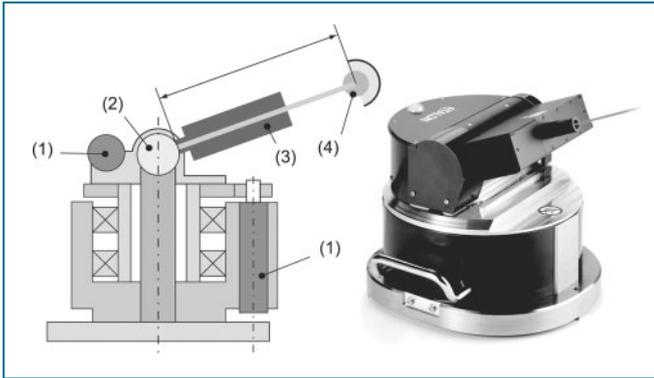


Abb. 3: Aufbau des Lasertracers, (1) Antriebe, (2) Präzisionskugel auf Invarstab, (3) Interferometer, (4) Reflektor (Cateye)

Bei der Kalibrierung der Drehachsen fließt die fehlerbehaftete Position des Reflektors als Information in die Messung ein. Vor der Messung der Drehachsen ist daher die Kalibrierung der Linearachsen anzuraten. Möglichkeiten, den Einfluss der kartesischen Achsfehler auf die Kalibrierung der Drehachsen zu minimieren, werden zurzeit von Etalon erprobt.

#### 4 Kinematische Kalibrierung mit LaserTracern

Um die Kalibrierung mit LaserTracern zu beschleunigen, erfolgt die Messung der statischen Fehlerparameter durch eine quasistatische Messung. Die Werkzeugmaschine verfährt mit gleichmäßiger Geschwindigkeit ohne Stopp am Messpunkt, so dass einerseits keine Zeit durch den Maschinenstillstand verloren geht, andererseits die Vergleichbarkeit zur statischen Messung erhalten bleibt, da keine Beschleunigungskräfte wirksam werden.

Eine Voraussetzung für die quasistatische Messung ist die synchrone Anbindung des Messsystems an die Werkzeugmaschine. Bei der statischen Messung erfolgt die Messung durch eine Stillstandserkennung. Die Information über die Maschinenposition ist aus dem NC-Programm bekannt. Bei der quasistatischen Messung muss die Information über die Maschinenposition synchron mit dem LaserTracer ausgelesen werden.

Als Lösung wurde am WZL das Dynamic Calibration Module (DCM) entwickelt, ein echtzeitfähiger Industrie PC mit Zählerkarten, mit dem die Analogsignale der Maschinensteuerung synchron mit dem Analogsignal des LaserTracers digitalisiert und gespeichert wird. Die Wegsignale der WZM werden direkt an der Maschinensteuerung über einen Y-Stecker abgegriffen (Abb. 6). Die Triggerung erfolgt über einen internen Taktgeber in definierten Zeitabständen von 20 Millisekunden. Dies entspricht bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 500 mm/s oder 3 m/min einem Intervall von einer Messung pro Millimeter.

Das wichtigste Merkmal des Verfahrens ist die Synchronizität der Messung von der WZM und dem LaserTracer, die einen direkten Einfluss auf die Messunsicherheit des Ergebnisses hat. Ein besonderes Augenmerk lag daher im Projekt auf der Untersuchung des Synchronizitätsfehlers,

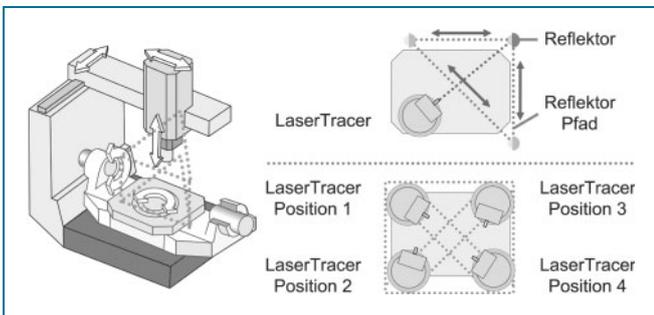


Abb. 4: Kalibrierung von Linearachsen mit LaserTracern

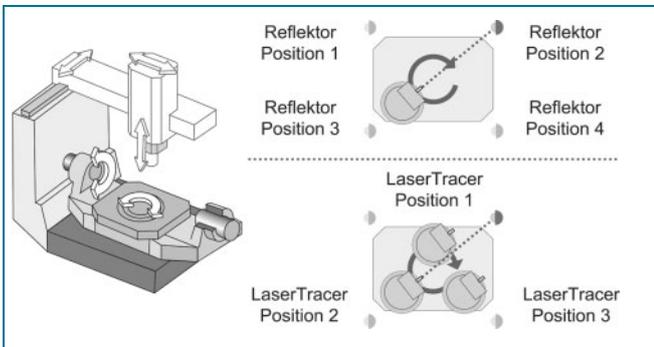


Abb. 5: Kalibrierung von Drehachsen mit LaserTracern

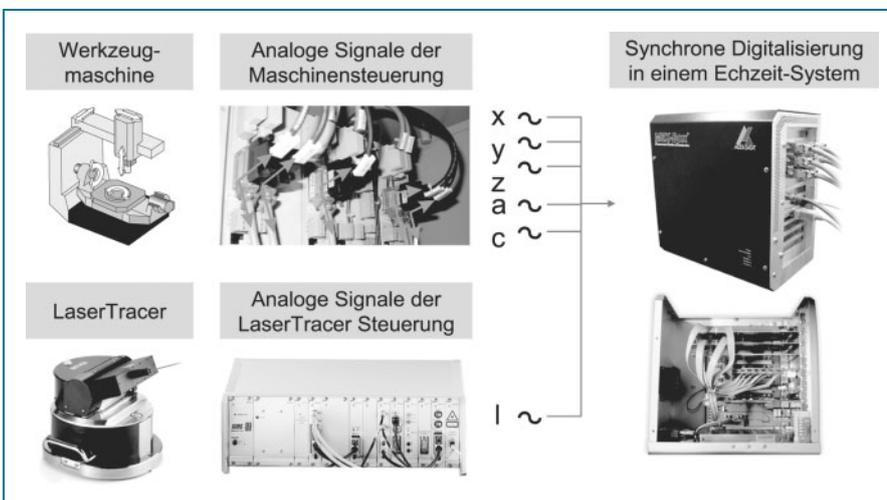


Abb. 6: Synchronisation der Quasistatischen Messung

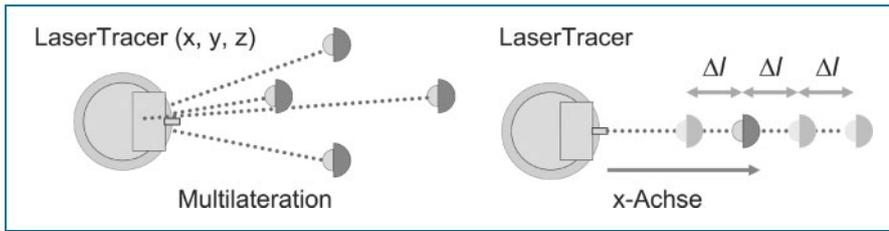


Abb. 7: Versuchsaufbau zur Beurteilung des Synchronizitätsfehlers

der durch einen einfachen Versuch ermittelt werden kann. Der LaserTracer wurde hierfür in der WZM befestigt und die Distanz zum Reflektor in mehrere Positionen gemessen, um die Position des LaserTracers im Maschinenkoordinatensystem über Multilateration bestimmen zu können (Abb. 7). Anschließend wurde der Reflektor in Messstrahl-Richtung, entlang der x-Achse verfahren und die Differenz aus dem gemessenen Signal der Achse und des LaserTracers gebildet.

Das Ergebnis der Messung entspricht der Positionsabweichung in x-Richtung. Vergleicht man die Ergebnisse miteinander, so liefert die WZM ein scheinbar ideales Wegsignal, dass nur durch einen zufälligen Anteil überlagert ist.

$$x_{WZM} = x_0 + v \cdot t + u_{WZM}$$

$$x_{Tracer} = x_0 + v \cdot (t + \Delta_{t,SYS}) + \Delta_{WZM,SYS}(x_{WZM}) + u_{Tracer,\Delta WZM,t}$$

Das Signal des LaserTracers enthält eine wegabhängige Abweichung  $\Delta x(x)$ , einen systematischen Synchronisationsfehler  $\Delta_{t,sys}$  und ebenfalls einen zufälligen Anteil. Der systematische Synchronizitätsfehler ist abhängig von der Verfahrgeschwindigkeit  $v$ , müsste also bei zunehmender Geschwindigkeit zu einer Verschiebung der Messwerte führen.

Die Ergebnisse der Messung sind in Abb. 8 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das mechanische Umkehrspiel der Achse und die Beschleunigungsphasen, die zu einem Überschwingen des Reflektors führen. Doch auch wenn die Geschwindigkeit von 100 mm/min um den Faktor 60 auf 6000 mm/min erhöht wird, ergibt sich der gleiche Kurvenverlauf. Ein systematischer Anteil ist nicht erkennbar.

Auch bei der Analyse des zufälligen Anteils wurde der gleiche Versuch ausgewertet. Unter der Annahme, dass

die Positionsabweichung an zwei benachbarten Messpunkten ungefähr gleich ist, wurden die Wegdifferenzen von der WZM mit den Wegdifferenzen des LaserTracers verglichen.

$$x_{WZM} = x_0 + v \cdot t + u_{WZM}$$

$$\Delta_{WZM} = x_{WZM,n} - x_{WZM,n+1} = u_{WZM}$$

$$x_{Tracer} = x_0 + v \cdot (t + \Delta_{t,SYS}) + \Delta_{WZM,SYS}(x_{WZM}) + u_{Tracer,\Delta WZM,t}$$

$$\Delta_{Tracer} = x_{Tracer,n} - x_{Tracer,n+1} = u_{Tracer,\Delta WZM,t}$$

$$\Delta_{Weg} = \Delta_{WZM} - \Delta_{Tracer} = u_{Gesamt}$$

Es bleibt die Streuung der beiden Messprozesse. Für die Auswertung der Ergebnisse wurde die erweiterte Standardabweichung (2 Sigma) der Ergebnisse bei konstanter Geschwindigkeit ausgewertet (Abb. 9). Es zeigt sich, dass die Streuung der Messung mit steigender Geschwindigkeit leicht zunimmt. Im Bereich von 4000–4500 mm/min wird die Streuung allerdings durch Vibrationen der WZM überlagert, die sich in einem steilen Anstieg der Streuung abbilden. Bei Geschwindigkeiten bis zu 6000 mm/min nimmt die Streuung wieder ab. Weitere Versuche jenseits der 6 m/min wurden nicht durchgeführt, da die Eingangsfrequenz des Signals vom LaserTracer durch die eingesetzte Zählerkarte nicht mehr zu verarbeiten wäre.

Durch die quasistatische Messung bei bewegter Maschine wird eine WZM zukünftig sehr viel schneller kalibriert werden können. Unter der Annahme einer Wartezeit von 3 Sekunden pro Messpunkt und einem Abstand von 20 mm zwischen den Messpunkten der statischen Messung, einer Geschwindigkeit von 3000 mm/min und 5 Positionen des LaserTracers kann die reine Messzeit der quasistatischen Messung auf 12 % der statischen Messung verkürzt werden. Bei einem Maschinenvolumen von einem Kubikmeter folgt eine absolute Reduktion der

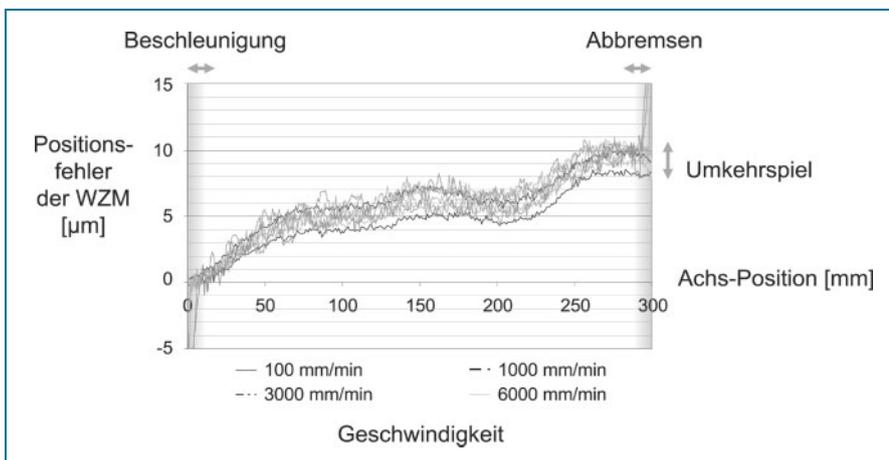


Abb. 8: Systematischer Synchronizitätsfehler

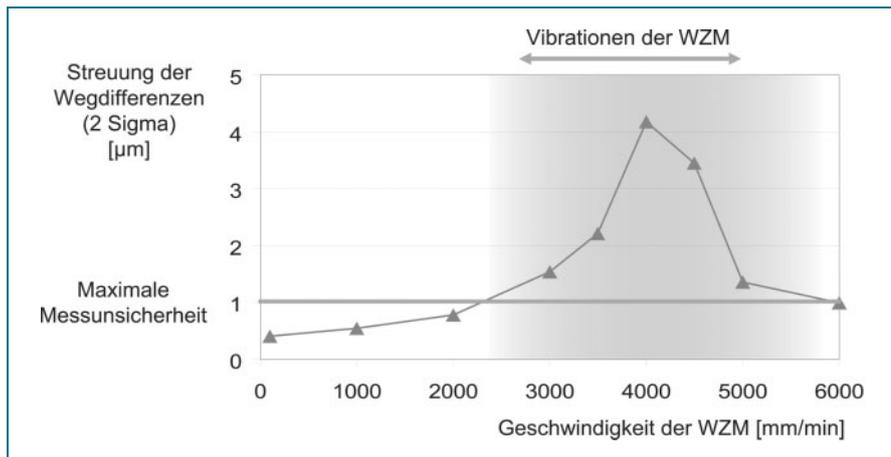


Abb. 9: Zufälliger Synchronizitätsfehler

Messzeit von 2,5 Stunden auf 21 Minuten. Der Einfluss des systematischen und des zufällige Synchronisationsfehlers können dabei vernachlässigt werden, solange keine Vibrationen der WZM das Ergebnis überlagern.

## 5 Fazit

Die Kalibrierung und die anschließende Korrektur ist ein wesentlicher Schritt bei der Inbetriebnahme und Überprüfung von Werkzeugmaschinen, durch die deren Positionsunsicherheit verringert und somit die Fertigungsqualität in einer Schlüsseltechnologie der Produktionstechnik verbessert wird.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Kooperationsprojekts haben die Firma Etalon und das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen die Voraussetzung geschaffen, das Verfahren der Kalibrierung mit LaserTracern um die Kalibrierung von Drehachsen zu erweitern. Zukünftig können 5-Achs-Werkzeugmaschinen mit einem einzigen System kalibriert werden. Durch die quasi-statische Messung bei bewegter Maschine konnte die Messzeit signifikant gesenkt werden, so dass wertvolle Produktivzeit bei der Inbetriebnahme und der Prüfung von WZM nutzbar gemacht werden kann.

## 6 Potential des LaserTracers

Neben der Kalibrierung von Werkzeugmaschinen kann der LaserTracer im Verbund von mindestens drei Systemen als Koordinatenmessgerät eingesetzt werden. Aufgrund der geringen Längemessunsicherheit und der Reduktion des Abbé Fehlers weist ein solches Koordinatenmessgerät eine sehr geringe Messunsicherheit auf. Das Messvolumen kann eine Kantenlänge von bis zu fünf Metern aufweisen. Wird ein vierter LaserTracer eingesetzt ist das System selbstkalibrierend. Mögliche Anwendungen sind der Ultrapräzisionsmaschinenbau sowie der Aufbau von Normalen z.B. zur Kalibrierung von kinematischen Messungen mit Lasertrackern oder Tachymetern.

## 7 Danksagung

Das Projekt PK-Mult wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Förderprogramms ProInno II gefördert.

## Literatur

- [1] WECK, M.; BRECHER, C.: Werkzeugmaschinen 1 – Maschinenarten und Anwendungsbereiche, Bd. 1, 6. Aufl., Berlin, Springer, 2005, 599 S.
- [2] PFEIFER, T.: Fertigungsmesstechnik. 2. Aufl., München, Oldenbourg, 2001, 419 S.
- [3] HÄRTIG, F.; KECK, C.; KNIEL, K.; SCHWENKE, H.; WÄLDELE, F.; WENDT, K.: Selbstnachführendes Laserinterferometer für die Koordinatenmesstechnik. Technisches Messen 71, (2004), Nr. 4, S. 227–232
- [4] SCHWENKE, H.; FRANKE, M.; HANNAFORD, J.: Error Mapping of CMMs and Machine Tools by a Single Tracking Interferometer. CIRP Annals 54 (2005), Nr. 1, S. 475–478
- [5] WENDT, K.; SCHWENKE, H.; BÖSEMANN, W.; DAUKE, M.: Inspection of Large CMMs by Sequential Multilateration using a Single Laser Tracker. Laser Metrology and Machine Performance 6 (2003), S. 121–130
- [6] SCHWENKE, H.; SANTEL, F.: GPS für die Werkzeugmaschine - Messtechnik zur schnellen Bestimmung der geometrischen Präzision. VDI-Z 148 (2006), Nr. 5, S. 47–49
- [7] ANSI/ASME B89.4.19, 2006, Performance evaluation of laser-based spherical coordinate measuring systems
- [8] SCHWENKE, H.; KNAPP, W.; HAITJEMA, H.; WECKENMANN, A.; SCHMITT, R.; DELBRESSINE, F.: Geometric Error Measurement and Compensation of Machines – an Update, CIRP Annalen 2007/2, Veröffentlichung im Januar 2008

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. ROBERT SCHMITT, Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am WZL und der Abteilung Produktionsmesstechnik & Qualität am IPT, Steinbachstr. 19, 52074 Aachen

Dipl.-Ing. PHILIPP JATZKOWSKI, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Steinbachstr. 19, 52074 Aachen

Dr. HEINRICH SCHWENKE, Etalon AG, Gelände der PTB – Besselbau, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

### **Innovative Messtechnik zur Kalibrierung von Werkzeugmaschinen**

**Mit dem LaserTracer, einem selbstnachfolgenden Laserinterferometer, können Werkzeugmaschinen schnell, einfach und präzise kalibriert werden. In einem Forschungsprojekt, haben die Firma Etalon und das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen die Kalibrierung durch die Messung bei bewegter Maschine beschleunigt und um die Möglichkeit zur Kalibrierung von zwei zusätzlichen Drehachsen erweitert.**

#### **Abstract**

**With the LaserTracer machine tools can be calibrated quickly, easily and with high precision. In a current research project of Etalon and the Laboratory for Machine Tools and Production Engineering of the RWTH Aachen, the calibration method is accelerated by measuring on the fly and enhanced by a module to calibrate two additional rotational axis.**

#### **Abstract**

**Le LaserTracer permet un étalonnage rapide, simple et précis avec un interféromètre auto-suivant. Dans un projet, l'entreprise Etalon et le laboratoire de machines-outils WZL de l'université RWTH Aachen ont accéléré l'étalonnage en mesurant la machine outil agitée. Egalement, ils ont développé la capacité d'étalonner deux axes de rotation supplémentaires.**