ETH zürich

ETH Library

Messung thermischer Einflüsse auf Werkzeugmaschinen zur steuerungsseitigen Fehlerkorrektur am Beispiel von Dreh-/ Schwenkachsen

Journal Article

Author(s):
Gebhardt, Michael; Knapp, Wolfgang; Wegener, Konrad

Publication date:
2014-04

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-c-000082769

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:
Technisches Messen 81(4), https://doi.org/10.1515/teme-2014-1025

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

tm – Technisches Messen 2014; 81(4): 158–165 — DOI 10.1515/teme-2014-1025 DE GRUYTER OLDENBOURG

Beiträge

Michael Gebhardt*, Wolfgang Knapp und Konrad Wegener

Messung thermischer Einflüsse auf Werkzeugmaschinen zur steuerungsseitigen Fehlerkorrektur am Beispiel von Dreh-/Schwenkachsen

Measurement of thermal influences on machine tools for axis correction using the example of rotary-/swivelling axes

Zusammenfassung: Thermische Einflüsse sind für bis zu 75% der geometrischen Fehler auf Werkstücken verantwortlich. Obwohl die Nachfrage für 5-achsige Werkzeugmaschinen immer weiter steigt, stehen bis jetzt die thermischen Einflüsse von Spindeln, Linearachsen und der Umgebungstemperatur im Mittelpunkt der Forschung. Dieser Beitrag beschreibt eine Prozedur zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens von Dreh-/Schwenkachsen von 5-achsigen Werkzeugmaschinen. Infrarotkameraaufnahmen visualisieren die Änderungen des Temperaturfeldes in der Maschinenstruktur aufgrund ausgeführter Achsbewegungen. Messungen mit Thermoelementen liefern detaillierte Temperaturdaten und zeigen spezielle Phänomene, wie sie vor allem bei schnell drehenden Rundachsen auftreten. Verlagerungsmessungen mit dem Messsystem R-Test ermöglichen zusammen mit einer phänomenologischen Modellierung die Vorhersage des thermischen Verhaltens von Rundachsen, was zu einer Reduktion des thermischen Fehlers der Maschine und somit zu einer erhöhten Bearbeitungsgenauigkeit genutzt werden kann.

Schlüsselwörter: Messtechnik, Thermische Abweichungen, Werkzeugmaschine.

Abstract: Thermally induced errors are responsible for up to 75% of the geometric errors on a workpiece. The demand for 5-axis machine tools is still increasing, but in the focus of thermal research there are only the influences of spindles, linear axes and the envionmental temperature change. In this article, a procedure for characterizing the thermal behaviour of rotary axes of five axes machine tools is described. Infrared camera records visualize the change of the temperature field in the machine tool structure due to underlying load cycles. Thermocouple measurements are carried out to receive detailed temperature data. They show phenomena which are typically for fast rotating axes. Displacement measurements with the measurement system R-Test enable a phenomenological modelling which can be used to predict the thermal behaviour of a rotatory axis. This can be used for a significant reduction of the total thermal error of a machine tool, and therefor to an increased accuracy.

Keywords: Metrology, Thermal errors, Machine tool.

***Korrespondenzautor: Michael Gebhardt,** IWF/ETH Zürich, Zürich, Schweiz, E-Mail: gebhardt@iwf.mavt.ethz.ch
Wolfgang Knapp, Konrad Wegener: IWF/ETH Zürich, Zürich, Schweiz

1 Motivation

Thermische Einflüsse auf Werkzeugmaschinen sind für bis zu 75% der geometrischen Fehler an Werkstücken verantwortlich [1]. Eine Reduktion thermischer Einflüsse oder die Kompensation des thermischen Fehlers einer Werkzeugmaschine ermöglicht so eine signifikante Erhöhung der Präzision in der Fertigungstechnik. Die einzelnen Beiträge zum gesamten thermischen Fehler einer Werkzeugmaschine wurden 1990 von Bryan [2] in folgende sechs Kategorien gegliedert:

- Prozesswärme,
- Abwärme der Maschine (Antriebe, etc.),
- Wärmeaustausch durch Kühlung oder Beheizen,

– Wärmeaustausch mit der Umgebung,
– Wärmeeinfluss von Personen,
– thermische Vorgeschichte.

Diese Einflüsse resultieren in einem inhomogen verteilten Temperaturfeld in der Maschinenstruktur, welches zu mechanischen Deformationen führt und so thermisch bedingte Abweichungen am Werkzeugnullpunkt (= Tool Center Point, TCP) verursacht.

Eine Minimierung thermisch bedingter TCP-Abweichungen kann entweder durch die Vermeidung thermischer Einflüsse [3], durch eine Kompensation der physikalischen Ursachen [4] oder durch einen steuerungsseitigen Korrektureingriff [5] erreicht werden.

Die Grundlage für solche Maßnahmen bildet ein ausreichendes Systemverständnis sowie die Kenntnis des Temperaturfeldes in der Werkzeugmaschinenstruktur und der resultierenden Abweichungen in Abhängigkeit der zugrunde liegenden thermischen Last. Hierfür notwendig sind sowohl Temperatur- als auch Verlagerungsmessungen, wobei sich dieser Beitrag speziell mit Dreh-/Schwenkachsen moderner 5-achsiger Fräsmaschinen beschäftigt.

Basierend auf einer messtechnischen Charakterisierung des Maschinenverhaltens können modellbasierte Kompensationsverfahren erstellt werden. Beispiele hierfür sind die Kompensation durch physikalische Modelle [6] oder phänomenologische Verfahren wie z. B. Abweichungsmodelle mit Fittingmethoden basierend auf Verzögerungselementen erster Ordnung (PT1) [7]. In diesem Beitrag werden Messungen genutzt, um Parameter einer Differenzialgleichung zu bestimmen, mit welcher das thermische Verhalten einer Drehachse berechnet werden kann.

2 Messtechnische Untersuchung des thermischen Verhaltens von 5-achsigen Werkzeugmaschinen

2.1 Temperaturmessung

Um grundlegendes Systemverständniss zu entwickeln und das Temperaturfeld, so wie die Wärmeströme in einer Maschinenstruktur qualitativ zu erfassen und zu visualisieren, eignen sich Infrarotkameraaufnahmen. Abbildung 1 zeigt die Wärmeentwicklung um den Antrieb einer horizontalen Schwenkachse während einer 5-stündigen Pendelbewegung zwischen ±90° (Abbildung A) und ±45° (Abbildung C). In Abbildung B befindet sich die Achse im Stillstand, was zu einem Abkühlen der Maschinenstruktur führt. Die Aufnahmen zeigen die lokale Erwärmung rund um den Achsantrieb - die interne Kühlung der Dreh-/Schwenkeinheit verhindert ein Abfließen der Wärme in die restliche Achsstruktur. Die gemessenen Temperaturanstiege von bis zu 7,5 °C lassen im gezeigten Beipsiel auf signifikante Verlagerungen schließen.

Im Anschluss an die qualitative Erfassung des Temperaturfeldes ermöglichen Messungen mit Sensoren in Kontakt, z. B. mit Thermoelementen, das Aufzeichnen einer detaillierten Temperaturcharakteristik während ausgewählter Lastzyklen. Gleichzeitig kann so eine Validierung der vorhergehenden Infrarotkameramessungen durchgeführt werden. Abbildung 2 [8] zeigt ein Temperaturmessgerät verbaut in einem IP65-Schutzgehäuse [9]. Das Messgerät kann mit zwei Hochleistungsakkumulatoren bis zu 48 Stunden lang betrieben werden und überträgt die erfassten Messdaten über eine WLAN-Verbindung kabellos zu einem Messrechner. Dies ermöglicht die Verwendung auch auf schnell drehenden Bauteilen wie z. B. Maschinentischen von 5-achsigen Werkzeugmaschinen, welche auch zur Drehbearbeitung geeignet sind. Abbildung 3 zeigt die Temperaturmessung eines Maschinentisches und der Lufttemperatur im Arbeitsraum während einer 4- stündigen Aufwärmphase mit 600 min^{-1} und einer 4-stündigen Abkühlphase (0 min^{-1}). Durch die Messung können drei charakteristische Effekte visualisiert werde: nach Beenden der Tischrotation tritt eine Temperaturspitze auf, obwohl keine Leistung mehr über den Achsantrieb der Drehachse eingebracht wird. Der kurzzeitige Anstieg wird durch ein anhaltendes Abfließen der Wärme aus dem Achsantrieb in den Tisch in Kombination mit einer signifikanten Reduktion der Konvektion durch Stoppen der Tischrotation verursacht. Nach ca. 6,5 h ist ein Knick in der Abkühlkurve der Tischtemperatur zu sehen, welche sich im Anschluss an die Arbeitsraumtemperatur annähert. Dies kann durch das Abschalten der internen Achskühlung zu diesem Zeitpunkt erklärt werden.

2.2 Verlagerungsmessungen nach ISO 230-3:2007

Die gemessenen Änderungen des Temperaturfeldes in Dreh- und Schwenkachsen von 5-Achs Werkzeugmaschinen lassen auf mechanische Deformationen und somit Lageabweichungen am TCP schließen. Zur Erfassung solcher Lageabweichungen induziert von z. B. Spindeln, Linearachsen oder der Änderung der Umgebungstemperatur beschreibt die Norm ISO 230-3:2007 [10] einen Aufbau zur Bestimmung der translatorischen und rotatorischen Verlagerungen eines Messdorns mit fünf linearen Abstandssensoren (Abbildung 4). Abbildung 5 (oben) zeigt das ther-

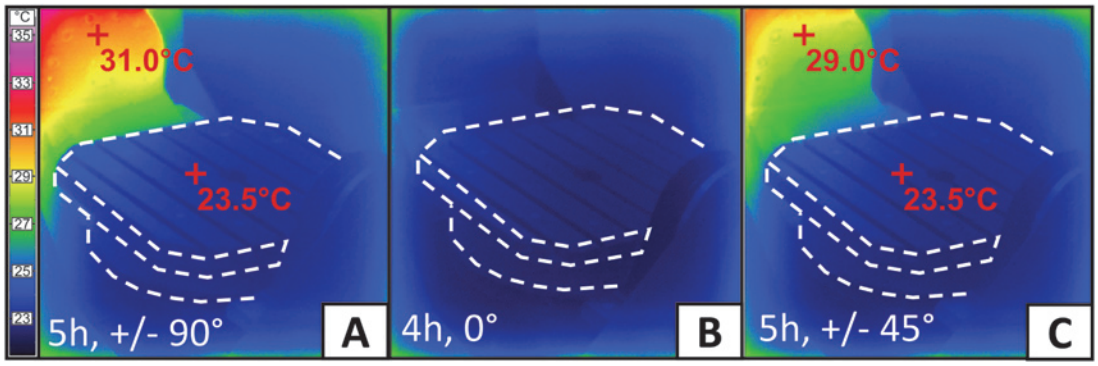

Abbildung 1: Wärmeentwicklung in der Maschinenstruktur rund um den Antrieb einer horizontalen A-Achse. Zugrundeliegender Lastzyklus: jeweils vierstündige Pendelbewegung der Achse zwischen A: $\pm 90^\circ$ und C: $\pm 45^\circ$. In B: Abkühlen während vier Stunden bei $A = 0^\circ$ (Abbildung aus [11]).

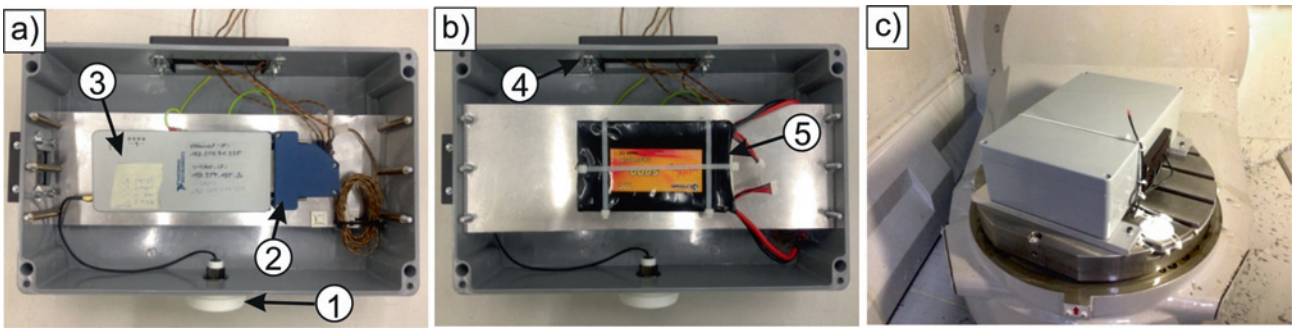

Abbildung 2: Temperaturmessgerät mit drahtloser Datenübertragung per WLAN zur Temperaturmessung auf rotierenden Oberflächen. 1 = externe WLAN Antenne, 2 = 16 Kanal Messkarte, 3 = WLAN – Modul (Bild (a)), 4 = IP65 [9] Kanal für Sensorik, 5 = Akkus zur Stromversorgung (Bild (b)); Messgerät während dem Betrieb (Bild (c)) (Abbildung aus [11]).

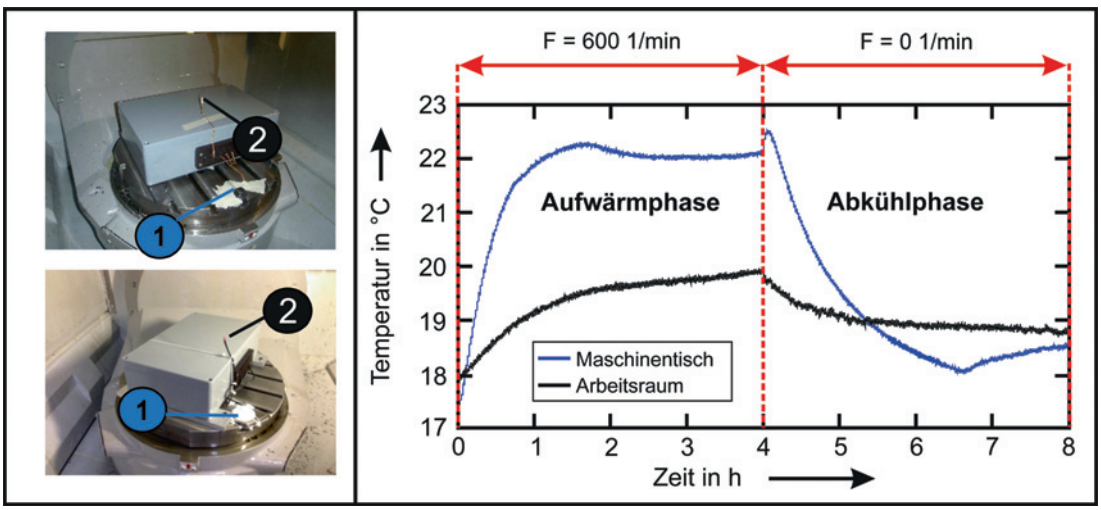

Abbildung 3: Messung der Oberflächentemperatur eines Maschinentisches während einer 4 stündigen Rotation mit $600\,\mathrm{min}^{-1}$. Nr. 1–2 (Bilder links) markieren die zwei Sensorpositionen der Messung welche im rechten Diagramm mit den korrespondierenden Farben dargestellt sind (Abbildung aus [11]).

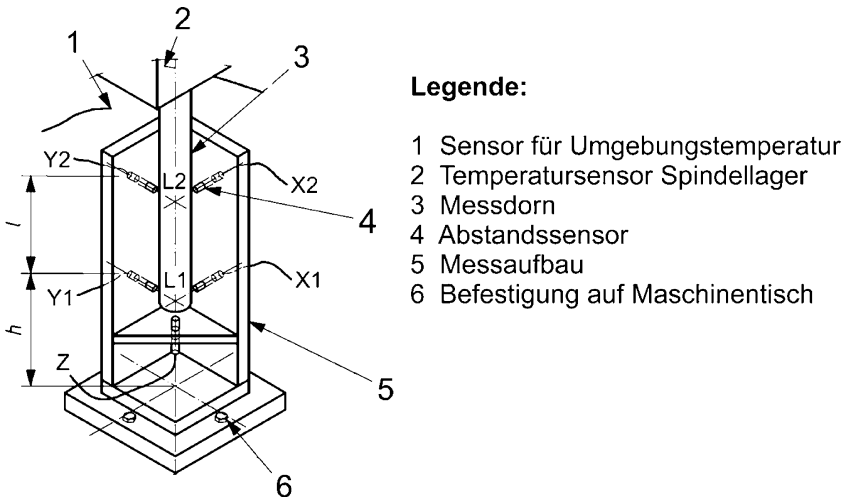

Abbildung 4: Messaufbau nach ISO 230-3:2007 [10] zur Charakterisierung des thermischen Einflusses durch Spindeln, Linearachsen und die Änderung der Umgebungstemperatur.

mische Verhalten einer Z-Linearachse während einer 4-stündigen Pendelbewegung mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 500 mm/min und einer 4-stündigen Abkühlphase. Während in der Aufwärmphase alle 5 Minuten eine

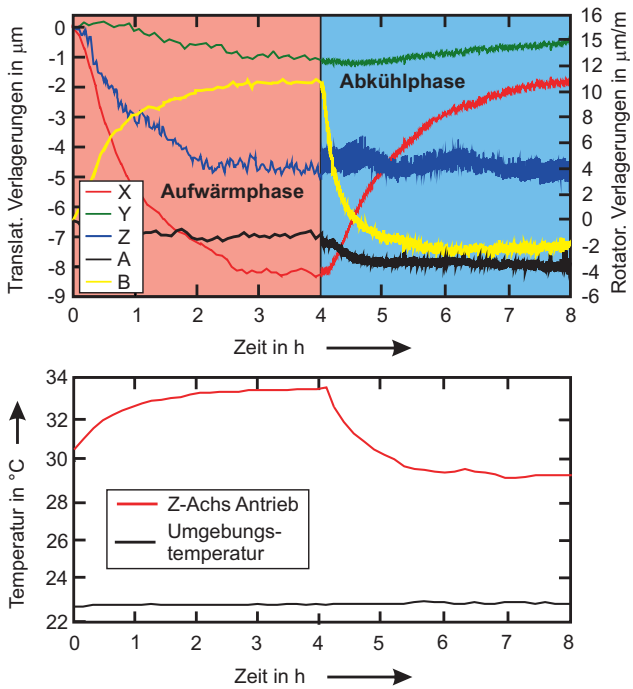

Abbildung 5: Oben: Lageabweichungen einer Z-Linearachse während 4 Stunden Aufwärmphase (Pendelbewegung mit 500 mm/min, diskrete Messung alle 5 Minuten mit NC-getriggerten, pneumatischen Sensoren) und 4 Stunden Abkühlphase (kontinuierliche Messung). Unten: Umgebungstemperatur und Temperatur des Z-Achsantriebs während dem Test (Abbildung aus [11]).

10 sekündige Messung der Lage durchgeführt wird, wird während der Abkühlphase kontinuierlich gemessen. Maximale Lageabweichungen können mit 8 µm (X-Richtung) in translatorischer Richtung und 11 µm/m (B-Richtung) in rotatorischer Richtung identifiziert werden. Im unteren Diagramm in Abbildung 5 ist sowohl die Umgebungstemperatur als auch die Temperatur des Antriebs der Z-Achse zu sehen, welche passend zur zugrundeliegenden thermischen Last ein PT1-Verhalten sowohl in der Aufwärm- als auch in der Abkühlphase zeigt.

2.3 Verlagerungsmessungen von Rotationsachsen mit dem R-Test

Eine vollständige Identifizierung der thermischen Abweichungen von Rotationsachsen mit dem Messaufbau beschrieben in ISO 230-3:2007 ist nicht möglich: Zum einen können Nullwinkelfehler (z. B. $C0C$ bei C-Achse) nicht erfasst werden, zum anderen können bestimmte thermische Abweichungen von Funktionsflächen (wie z. B. das radiale Wachstum eines Maschinentischs), welche durch Rotationsachsen induziert werden können, nicht gemessen werden. Zusätzlich wird vor allem bei der Messung von horizontalen Achsen bei großen Dreh-/Schwenkeinheiten mit großen Achsoffsets die Montage äußerst komplex. Ein geeignetes Messmittel zur ganzheitlichen Erfassung thermischer Abweichungen von Rundachsen stellt der R-Test [12, 13] dar. Zur Erfassung thermischer Abweichungen kann der R-Test mit diskreten Messungen [14] aber auch mit einer kontinuierlichen Bewegung [15] durchgeführt werden. Abbildung 6 zeigt beispielhaft den Messzyklus des R-Test

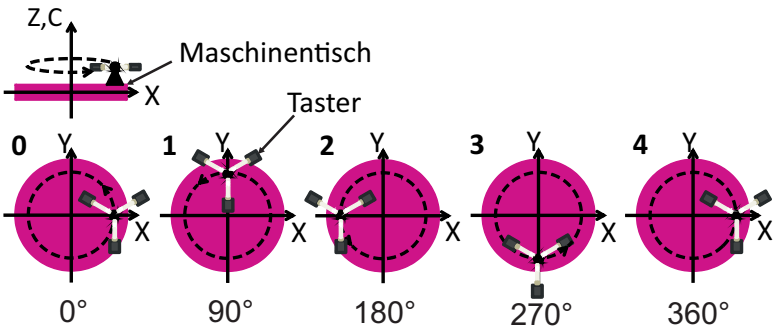

Abbildung 6: Diskreter R-Test zur Bestimmung der Lageabweichungen einer Rotationsachse C: 5 Messungen werden ausgeführt bei $C = 90^\circ$, 180°, 270° und 360°. Die bewegung des TCP wird durch die Rotation der zu messenden Achse (Im Beispiel: C-Achse) in Kombination mit einer Bewegung der spindelseitigen Linearachsen (z. B. X, Y) realisiert (Abbildung aus [14]).

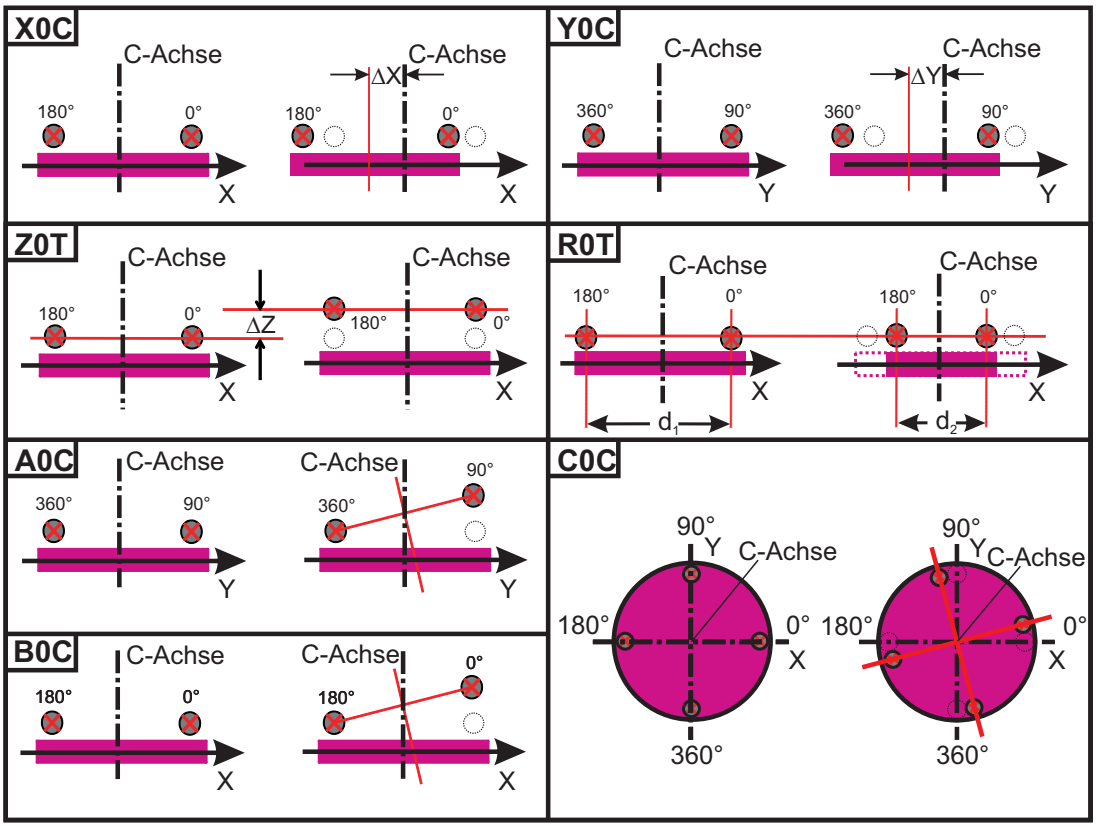

Abbildung 7: Diskreter R-Test: Auswertung der sieben charakteristischen, thermisch induzierten Fehler einer vertikalen Drehachse eines Maschinentisches (Im Beispiel: C-Achse) (Abbildung aus [11]).

diskret für eine C-Achse: an vier Punkten (Winkel zwischen den vier Punkten: 90°) wird mit mindestens 3 Lineartastern gegen eine Präzisionskugel getastet (Messung zwischen Werkstück und Werkzeug). Durch mehrere, aufeinanderfolgende Messzyklen mit einem definierten zeitlichen Abstand kann anschließend die thermisch bedingte Änderung aller Lageabweichungen der Achse nach Abbildung 7 bestimmt werden.

3 Phänomenologische Bestimmung thermischer Abweichungen von Rundachsen

Die mit dem Messystem R-Test bestimmten Lageabweichungen von Rundachsen bei variierenden Lastzyklen erlauben eine phänomenologische Modellierung des ther-

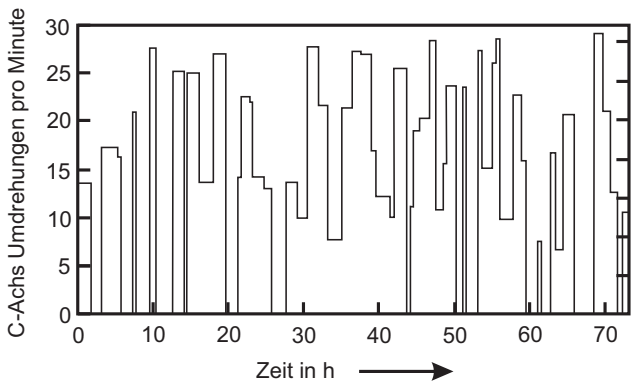

Abbildung 8: Testzyklus 1: automatisch generierter Zufallsverlauf für eine C-Achs Bewegung über ca. 73 Stunden (Abbildung aus [11]).

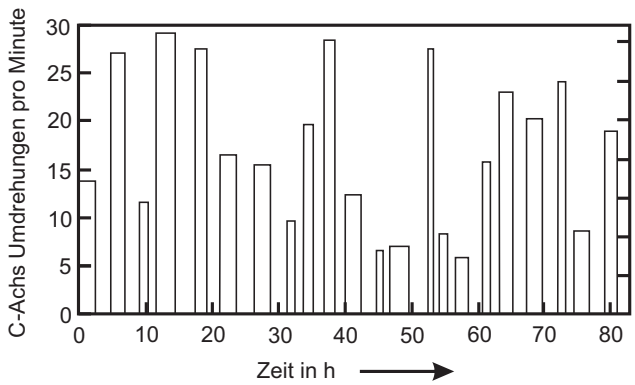

Abbildung 10: Testzyklus 2: automatisch generierter Zufallsverlauf für eine C-Achs Bewegung über ca. 83 Stunden (Abbildung aus [11]).

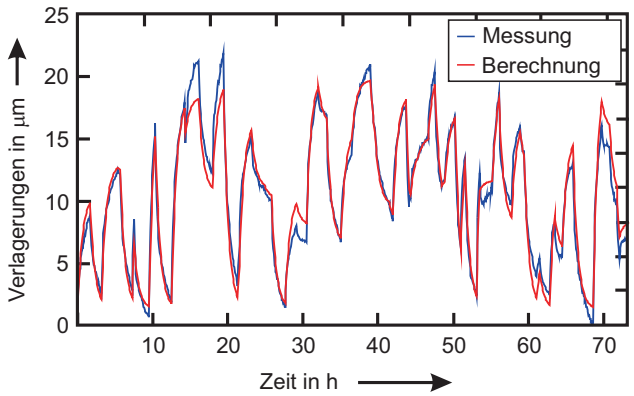

Abbildung 9: Lageabweichung XOC: Gemessene und gefittete Verlagerung zur Parameteridentifikation für den Testzyklus 1 (Abbildung 8) (Abbildung aus [16]).

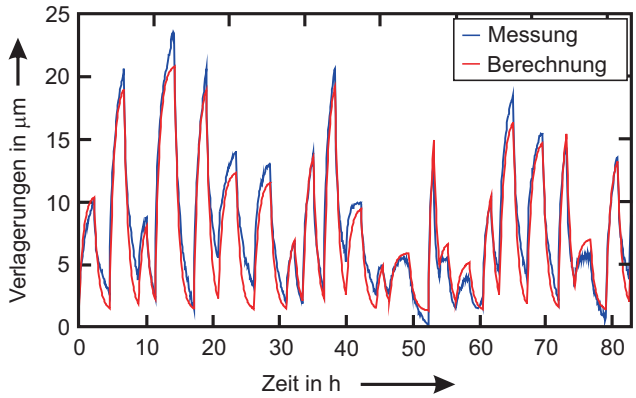

Abbildung 11: Vorhersage von XOC-Abweichungen während dem Lastzyklus 2 (Abbildung 10) basierend auf der Parameterbestimmung aus Testzyklus 1 (Abbildung 9) (Abbildung aus [16]).

mischen Verhaltens zur steuerungsseitigen Korrektur. Eine Möglichkeit der Umsetzung bietet die Verwendung einer Differentialgleichung

$$\frac{dy}{dt} = p_1 \cdot y + p_2 \cdot (u + p_3) \tag{1}$$

mit dem Eingangsparameter u (z. B. die Drehzahl einer Achse oder der Leistungsbedarf eines Achsantriebs ausgelesen aus der Steuerung der Werkzeugmaschine) und den drei konstanten Parametern $p_1 \ldots p_3$. Die zeitliche Änderung einer Lageabweichung $\frac{dy}{dt}$ kann hiermit berechnet werden, sobald die konstanten Parameter $p_1 \ldots p_3$ für das untersuchte System identifiziert sind. Hierfür wird ein zufällig erstellter Bewegungsverlauf (Beispiel: C-Achse) (Abbildung 8) zusammen mit der zugehörigen Messung einer Lageabweichung (Beispiel: XOC, blauer Graph in Abbildung 9) verwendet. Durch einen Vergleich der Messung mit den während der Parameteridentifikation berechneten Daten (roter Graph in Abbildung 9) kann die Fähigkeit der gewählten Differentialgleichung, das vorherrschende System Abbilden zu können, plausibilisiert werden.

Für eine Verifikation der Parameter wird ein grundlegend unterschiedliches Bewegungsprofil der relevanten Achse gewählt (Abbildung 10). Die zu erwartenden Lageabweichungen können anschließend basierend auf der verwendeten Differenzialgleichung zusammen mit den identifizierten Parametern berechnet werden (Beispiel XOC, roter Graph in Abbildung 11). Eine Messung der berechneten Lageabweichung (Blauer Graph in Abbildung 11) ermöglicht anschließend die Verifikation des Modells.

Mit diesem Verfahren sind beispielhaft die wesentlichen thermischen Abweichungen einer Werkzeugmaschine, hervorgerufen durch eine kombinierten Bewegung beider Rundachsen, deutlich verkleinert worden. Die Spanne der X-Verlagerung der C-Achse (XOC) wurde um 47%

reduziert, die Spanne der Z-Verlagerung des Maschinentisches (ZOT) um 62% und die Spanne des radialen Tischwachstums (ROT) um 71%.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch Infrarotkameraaufnahmen kombiniert mit Temperaturmessungen in Kontakt kann das Temperaturfeld einer Werkzeugmaschine inklusive Dreh-/Schwenkachsen charakterisiert werden. Während die thermischen Abweichungen verursacht durch Spindel, Linearachsen oder die Umgebungstemperatur analog zur Norm ISO 230-3:2007 erfasst werden können, ist für die vollständige Messung der Abweichungen von Dreh-/und Schwenkachsen ein anderes Messprinzip nötig. Ein geeignetes Verfahren stellt zum Beispiel der R-Test dar.

Basierend auf R-Test Messungen von thermisch induzierten Lageabweichungen während einem zufällig erstellten Bewegungsablauf konnten Parameter einer Differenzialgleichung identifiziert werden, welche die Vorhersage thermischer Abweichungen ermöglichen. Hierdurch wird eine steuerungsseitige Korrektur möglich, welche zu einer Verbesserung der Bearbeitungsgenauigkeit von 5-Achs Werkzeugmaschinen führt.

Eingang 27. Januar 2014; angenommen 28. Februar 2014.

Literatur

1. *Mayr, J.; Jedrzejewski, J.; Uhlmann, E.; Donmez, M. A.; Knapp, W.; Haertig, F.; Wendt, K.; Moriwaki T.; Shore, P.; Schmitt, R.; Brecher, C.; Wuerz, T. and Wegener, K.*: Thermal issues in machine tools. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61(2):771–791, 2012.
2. *Bryan, J.*: International status of thermal error research. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 39(2):645–656, 1990.
3. *Bryan, J; Carter, D. L.; Clouser, R. W.; Hamilton, J. H.*: An order of magnitude improvement in thermal stability with use of liquid shower on a general purpose measuring machine. Workshop on precision machining, Society of Mechanical Engineers, Minnesota 1982.
4. *Mitsuishi, M.; Warisawa, S.; Hanayama, R.*: Development of an Intelligent High-Speed Machining Center, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 50(1):275–280, 2001.
5. *Brecher, C.; Hirsch, P.; Weck, M.*: Compensation of Thermoelastic Machine Tool Deformation Based on Control internal Data, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 53(1):299–304, 2004.
6. *Gebhardt, M.; Schneeberger, A.; Knapp, W.; Wegener, K.*: Measuring, modeling and compensating thermally caused location errors of rotary axes, The Proceedings of MTTRF 2013 Annual Meeting, San Francisco, 2013.
7. *Gebhardt, M.; Ess, M.; Weikert, S.; Knapp, W.; Wegener, K.*: Phenomenological Compensation of Thermally caused Position and Orientation Errors of Rotary Axes, Journal of Manufacturing Processes, DOI 10.1016/j.jmapro.2013.05.007, 2013
8. *Gebhardt, M.; Schneeberger, A.; Capparelli, S.; Knapp, W.; Wegener, K.*: Messtechnische Charakterisierung thermisch bedingter Abweichungen von 5-Achs Werkzeugmaschinen, XXVII. Messtechnisches Symposium des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik e. V., Seiten 25–36, Zürich, 2013, ISBN 978-3-8440-2124-0.
9. *DIN EN 60529; VDE 0470-1:2009*: Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code), 2000.
10. *ISO 230-3:2007*: Testcode for machine tools - Part 3: Determination of thermal effects. Geneva, Switzerland, 2007.
11. *Gebhardt, M.*: Thermal Behaviour and Compensation of Rotary Axes in 5-Axis Machine Tools, ETH Dissertation No. 21733, ETH Zurich, 2014, ISBN: 978-3-906031-51-4.
12. *Weikert, S.*: When five axes have to be synchronized. Proceedings of the 7th Lamdamap conference, pages 87–96, 2005.
13. *Weikert, S.; Knapp, W.*: R-Test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 53(1):429–432, 2004.
14. *Gebhardt, M.; von Cube, P.; Knapp, W.; Wegener, K.*: Measurement setups and cycles for thermal characterization of axes of rotation. In 12th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, 2012.
15. *Ibaraki, S.*: Error calibration for five-axis machining centers and new proposal to ISO standards. The 15. International Machine Tool Engineers' Conference Proceedings, 1:72–81, 2012.
16. *Gebhardt, M.; Mayr, J.; Furrer, N.; Widmer, T.; Weikert, S.; Knapp, W.*: High precision grey-box model for compensation of thermal errors on 5-axis machine tools. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2014.

Dr. Michael Gebhardt
IWF/ETH Zürich, Tannenstrasse 3, CH-8092 Zürich, Schweiz, Tel.: +41 44 633 92 65, Fax: +41 44 632 11 25
gebhardt@iwf.mavt.ethz.ch

Dr. Michael Gebhardt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (www.iwf.mavt.ethz.ch) der ETH Zürich.

Dr. Wolfgang Knapp
IWF/ETH Zürich, Tannenstrasse 3, CH-8092 Zürich, Schweiz, Tel.: +41 44 632 46 62, Fax: +41 44 632 11 25
knapp@iwf.mavt.ethz.ch

Dr. Wolfgang Knapp ist Gruppenleiter Messtechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (www.iwf.mavt.ethz.ch) der ETH Zürich.

Prof. Dr. Konrad Wegener
IWF/ETH Zürich, Tannenstrasse 3, CH-8092 Zürich, Schweiz, Tel.: +41 44 632 24 19, Fax: +41 44 632 11 25
wegener@iwf.mavt.ethz.ch

Prof. Dr.-Ing. Konrad Wegener ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigung (www.iwf.mavt.ethz.ch) der ETH Zürich.