



1 Einleitung

Die eigenschaftsmodellbasierte Korrektur ist eine sogenannte Grey-Box-Korrektur. Sie zeichnet sich durch einen mittleren Abstraktionsgrad aus und weist noch einen Bezug zu den für thermo-elastische Fehler ursächlichen physikalischen Phänomenen der Wärmelehre auf. Der Bezug wird durch die Verwendung von Verzögerungsgliedern niedriger Ordnung (PT-Glieder) als Ansatzfunktion zur Abbildung des Maschinenverhaltens hergestellt, vgl. Abb. 1.

Der mittlere Abstraktionsgrad sichert einerseits eine eingeschränkte Fähigkeit zur Extrapolation über den parametrisierten Wertebereich hinaus. Gleichzeitig ist andererseits ein geringerer Aufwand zur Parametrierung notwendig als bei White-Box-Korrekturmethode, die auf viele einzeln zu parametrierende Submodelle zurückgreifen.

Eingangsgrößen der eigenschaftsmodellbasierten Korrektur sind maschineninterne Daten (z. B. Achsgeschwindigkeiten). Vorteil dieses Vorgehens ist, dass für Fehlerursachen, denen maschineninterne Daten zugeordnet werden können, keine zusätzliche Messtechnik notwendig ist. Dadurch fallen keine Kosten zum Kauf und Aufwände zur Einrichtung der Messtechnik an. Darüber hinaus wäre Messtechnik eine mögliche, zusätzliche Fehlerursache an der Maschine mit aktiver Korrektur.

R. Spierling · M. Dehn (✉) · F. Plum · C. Brecher
Werkzeugmaschinenlabor, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

F. Plum
E-Mail: F.Plum@wzl.rwth-aachen.de

C. Brecher
E-Mail: C.Brecher@wzl.rwth-aachen.de

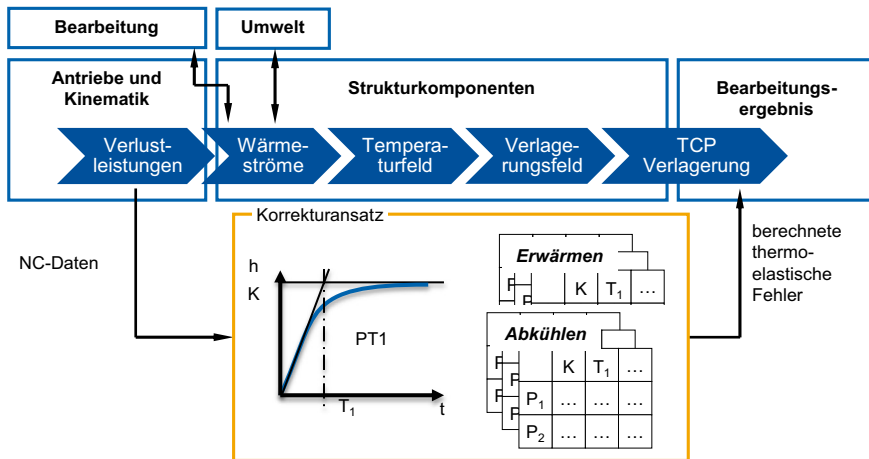


Abb. 1 Vorgehen der eigenschaftsmodellbasierten Korrektur (Grossmann 2015)

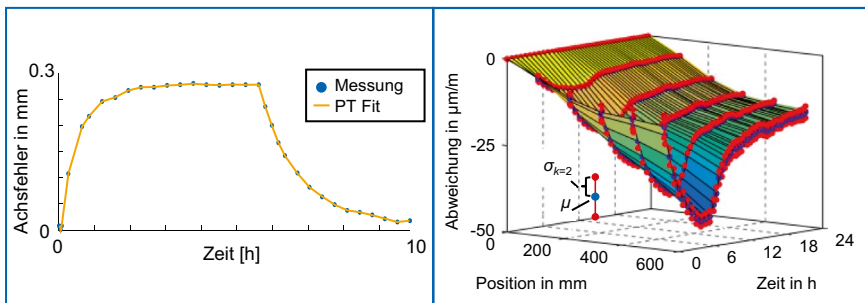


Abb. 2 Thermo-elastische Längung eines KGTs (links) (Naumann et al. 2017); Aufbau eines volumetrischen Gierfehlers (rechts) (Wennemer 2018)

Wird ein thermo-elastischer Fehler einer Achse an einem Punkt auf der Achse gemessen, resultiert ein Messschrieb wie in Abb. 2 (links) dargestellt. Eine Beschreibung mit einem PT-Glied ist im Bild ebenfalls gezeigt. Im Folgenden wird ein Ansatz beschrieben, der eine volumetrische Korrektur der thermo-elastischen Fehler ermöglicht. Die von der Maschinenpose abhängigen Anteile der Fehler werden also ebenfalls berücksichtigt, da Fehler ein über die Achslänge veränderliches Profil aufweisen können, siehe Abb. 2 (rechts).

Dieser volumetrische thermo-elastische Fehler muss sowohl räumlich (Aufbau über die Achslänge) als auch zeitlich (infolge des thermo-elastischen Verhaltens der Maschine) beschrieben werden. Dieses Vorgehen erfordert gemessene volumetrische Verlagerungsdaten für die Parametrierung der Korrektur, was mit erheblichem Aufwand für teure Messtechnik und die Auswertung verbunden ist.

Dieser Beitrag zeigt im Folgenden die Grundlagen der eigenschaftsmodellbasierten Korrektur (Abschn. 2), eine exemplarische Umsetzung der Korrektur (Abschn. 3) und eine Zusammenfassung (Abschn. 4).

2 Grundlagen der eigenschaftsmodellbasierten Korrektur

Die Entwicklung einer eigenschaftsmodellbasierten Korrektur für eine spezifische Werkzeugmaschine gliedert sich in sechs Schritte (Abb. 3).

Zuerst ist zu prüfen, welche Möglichkeiten bestehen, Korrekturmodelle in der Maschinensteuerung zu hinterlegen. Es ist zu klären, ob transiente Korrekturwerte auf der Steuerung berechnet werden können oder ob die Berechnung auf externer Hardware durchgeführt werden muss.

Dann sind geeignete Eingangsgrößen für die Korrektur zu identifizieren. Für einen konkreten Anwendungsfall lassen sich diese Eingangsgrößen aus der thermo-energetischen Wirkungskette ableiten. Ein Abgleich mit in der Steuerung verfügbaren Werten grenzt die potenziellen Eingangsdaten ein.

Im nächsten Schritt ist festzulegen, durch welches Messverfahren Verlagerungsdaten zur Parametrierung des Modells erfasst werden. Diese sind während der entsprechenden Versuche zusammen mit den ausgewählten Steuerungsdaten aufzuzeichnen. Eine umfangreiche Übersicht über mögliche Messmittel ist in (Brecher und Weck 2017) gegeben.

Für diese Versuche müssen im vierten Schritt Lastregime für die zu untersuchenden Einflüsse definiert werden. Eine vollumfängliche Abdeckung aller denkbaren Lastfälle ist dabei aufgrund des großen Versuchsumfangs aus ökonomischen Gründen oft nicht möglich. In diesem Fall ist eine geeignete Auswahl der häufigsten zu erwartenden Lastfälle zu treffen. Nicht berücksichtigte Lastfälle können einen kleinen Anteil der Validierung einnehmen, um sicherzustellen, dass diese

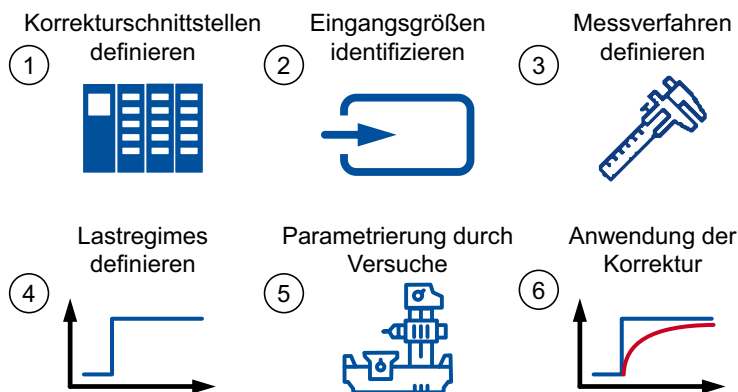


Abb. 3 Schritte zur Anwendung einer eigenschaftsmodellbasierten Korrektur

keine Verschlechterung des Maschinenverhaltens hervorrufen. Exemplarisch sind ein Lastspektrum sowie die resultierende Verlagerung und der resultierende Temperaturgang der Maschine in Abb. 4 dargestellt. Der Verlauf der Temperatur und der Verlagerung ergibt sich aus dem gewählten Lastspektrum. Hierbei wurde im ersten Teil ein variabler Verlauf der Last und im zweiten Teil eine konstante Last in Kombination mit längeren Abkühlphasen gewählt.

Nach der Durchführung der Versuche werden die Verzögerungsglieder niedriger Ordnung parametrisiert. Für viele Anwendungsfälle ist bereits ein Verzögerungsglied erster Ordnung (PT1) ausreichend. Gl. 1 zeigt die lineare Differentialgleichung des PT1-Glieds.

$$T \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t) \quad (1)$$

Für jeden in den Versuchen zur Parametrierung berücksichtigten Eingangswert werden dabei die Werte der Koeffizienten des PT-Glieds bestimmt. Abschließend kann eine Ausgleichsfunktion für die Koeffizienten in Abhängigkeit der Eingangsgröße bestimmt werden, wie in (Naumann et al. 2017) gezeigt, siehe Abb. 5. Dabei sind insbesondere Aufwärmphasen der Maschine und Abkühlphasen durch verschiedene PT-Glieder zu modellieren, da sich ohne die für die Aufwärmung ursächliche Last andere Zeit- und Sprungkonstanten der PT-Glieder für das thermo-mechanische System „Maschine“ ausbilden.

Werden mehrere Eingangsgrößen ausgewählt, sind nacheinander je Eingangsgröße einzelne Verzögerungsglieder zu parametrieren. Dabei wird das nächste Verzögerungsglied aus dem Restfehler des vorherigen PT-Glieds erstellt. Weisen im Versuchsspektrum berücksichtigte Eingangsgrößen keinen relevanten Einfluss auf,

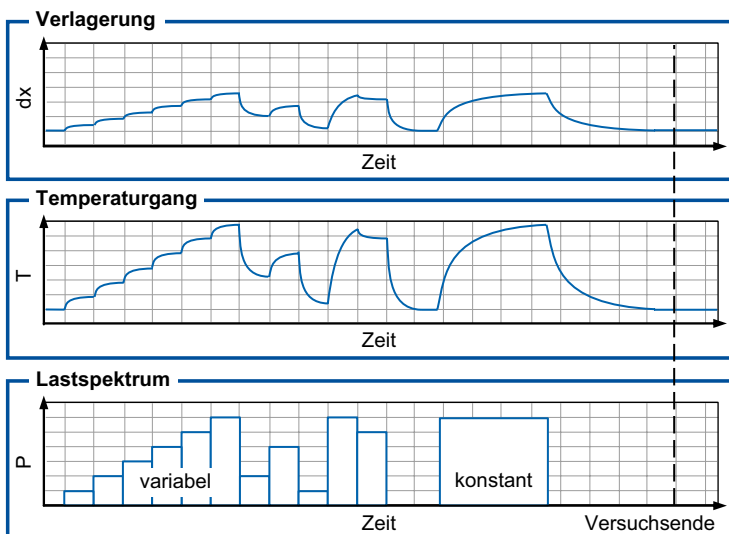


Abb. 4 Verlagerungen, Temperaturgang und Lastspektrum eines Versuchs

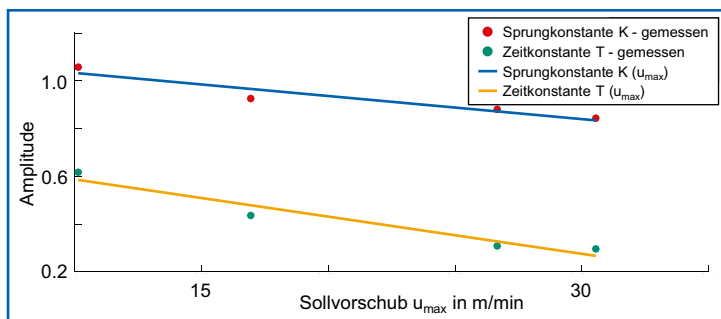


Abb. 5 PT1-Koeffizienten in Abhängigkeit des Sollvorschubs (Naumann et al. 2017)

können sie vernachlässigt werden. Dies reduziert die Komplexität der Korrektur und den Auswerteaufwand für zukünftige Versuche.

Als letzter Schritt ist nach der Parametrierung die Korrektur auf der Maschine über die im ersten Schritt identifizierten Schnittstellen zu applizieren und durch Versuche zu validieren. Der Wertebereich der Validierungsversuche sollte sowohl in der Parametrierung verwendete Werte nutzen als auch davon abweichende Werte. Die bekannten Werte belegen die erreichbare Genauigkeit der Parametrierung der Korrektur. Die nicht berücksichtigten Werte prüfen die Fähigkeit der Korrektur zur Inter- bzw. Extrapolation. Zusammen belegen sie die Wirksamkeit der Korrektur.

3 Anwendung der Korrektur

Nachfolgend wird exemplarisch erst die Korrektur einer einzelnen Drehachse nach (Brecher et al. 2018) beschrieben und dann die Korrektur einer linearen 3-Achs-Kinematik nach (Wennemer 2018) erläutert.

Die Beispiele sind entlang der im vorherigen Kapitel vorgestellten Schritte strukturiert. Der erste Schritt muss spezifisch für die konkrete Maschinensteuerung durchgeführt werden. Beispielsweise kann bei einer Sinumerik-Steuerung die Durchgangskompensation oder das *Volumetric Compensation System* (VCS) verwendet werden. Da diese Steuerungsoptionen jedoch für die Kompensation von Geometriefehlern und nicht von thermo-elastischen Fehlern ausgelegt sind, ist die Verwendung weiterer Softwarebausteine notwendig. An Steuerungen anderer Hersteller kann andere Software zur Kompensation notwendig sein.

3.1 Korrektur einer Drehachse

Ein Standardmessaufbau zur Untersuchung des thermo-elastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen ist in der ISO 2303 (2007) beschrieben. Der Messaufbau mit einem tischseitigen Messnest inkl. fünf Verlagerungssensoren und einem in der Spindel montierten Dorn ist in Abb. 6 (links) dargestellt. Aus den Ergebnissen der fünf Verlagerungssensoren können die Fehler des Tool-Center-Points (TCP) in den drei Koordinatenrichtungen sowie zwei Winkelfehler bestimmt werden. Die Fehler sind dann für die TCP-Position am jeweiligen Dorn gültig. Es wird empfohlen den Dorn und das Messnest aus Invar (Eisen-Nickel Legierung mit sehr geringer thermo-elastischer Dehnung – $\alpha_{th} = 1,7 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$) zu fertigen, damit eine thermo-elastische Dehnung des Messequipments nicht als Maschinenfehler interpretiert wird.

Für die Validierung der Korrektur der Drehachse besteht der Messaufbau aus einer angepassten Variante. Er umfasst ein spindelseitig appliziertes Sensornest mit fünf Verlagerungssensoren sowie fünf auf dem Tisch fixierte Dorne. Für die Korrektur kommt der im Zentrum des Tisches platzierte Dorn zum Einsatz. Mittels der anderen Dorne wird zusätzlich die Ebenheit der Tischoberfläche überwacht. Da diese jedoch im vorliegenden Fall keine nennenswerte Schwankung aufweist, werden die Ergebnisse nicht für die Korrektur berücksichtigt.

Mögliche für die Drehachse relevante Verlustleistungen sind die Verlustleistung des im Tisch verbauten Motors und die Reibleistung der Lagerung der Drehachse. Da der Motor im vorliegenden Fall wassergekühlt ist, wird seine Verlustleistung durch die Kühlung als möglicher Einfluss eliminiert. Die Kühlung selbst als Wärmesenke könnte einen Einfluss haben, was hier jedoch nicht der Fall war. Die Reibleistung der Achslagerung ist abhängig von der jeweiligen Lagerlast und der Drehzahl bzw. dem Achsvorschub. Da die Lagerlasten nicht ohne größeren Aufwand aus maschineninternen Daten gewonnen werden können, wird hier der Soll-Vorschub der Achse als Eingangsgröße gewählt.

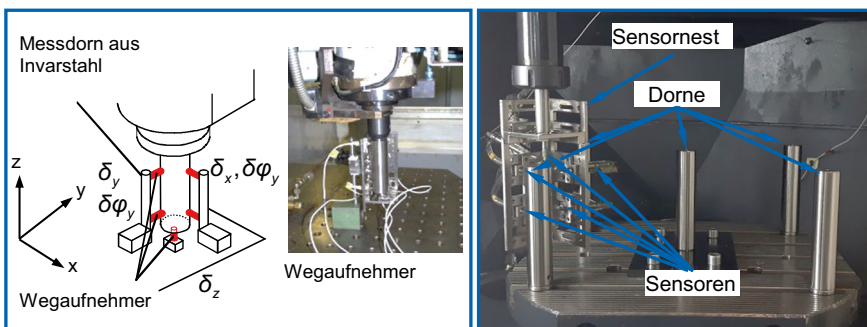


Abb. 6 Verlagerungsmessung per Messnest (links) (Brecher und Weck 2017) Messaufbau Drehachsmessung (rechts) (Naumann et al. 2017)

Zwecks Parametrierung des Modells werden drei verschiedene Vorschübe (5000 min^{-1} , 10.000 min^{-1} und 15.000 min^{-1}) sowie die Abkühlung untersucht, um die Koeffizienten eines PT1-Glieds in Abhängigkeit des Soll-Vorschubs zu bestimmen, wie in (Naumann et al. 2017) beschrieben.

Die erreichte Korrekturqualität ist in Abb. 7 dargestellt. Der maximale Fehler kann auf $14\text{ }\mu\text{m}$ begrenzt werden. Für die Beispielmachine stellt dies eine Reduktion des Fehlers um 50 % dar. Weiteres Verbesserungspotenzial zeigt sich für die zeitaufwendige Parametrierung. Durch die Untersuchung neuer Parametrierungsstrategien kann hier die benötigte Zeit zur Parametrierung verkürzt und somit die der Aufwand der Parametrierung reduziert werden. Bei langsamen Vorschüben weist die Korrektur die größten Fehler auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Messfehler nicht linear mit der Messgröße ansteigt, sondern konstant ist.

Bei kleineren Vorschubgeschwindigkeiten ist somit der prozentuale Fehler groß wodurch die parametrisierten Faktoren der Verzögerungsglieder einen höheren Fehler aufweisen. In einem solchen Fall können zusätzliche Versuche die Korrekturgüte steigern.

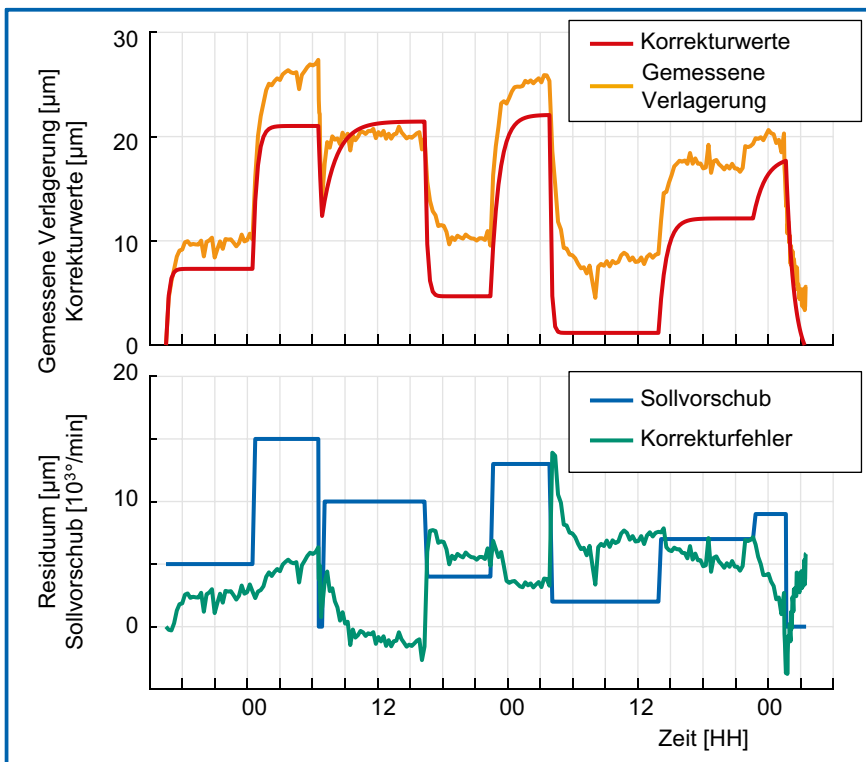


Abb. 7 Korrekturergebnis Drehachse (Brecher et al. 2018)

3.2 Korrektur einer 3-Achs Kinematik

Die in diesem Unterkapitel vorgestellte Korrektur ist für die in Abb. 8 (links) dargestellte 3-Achs-Maschinenkinematik erarbeitet worden.

Zur Messung der Verlagerungen kamen Lasertracer zum Einsatz (Schwenke et al. 2005). Vier Lasertracer wurden in einen Aufbau aus Karbon integriert, siehe Abb. 8 (rechts). Dieser Aufbau kann 17 von 21 thermo-elastischen Fehlern der 3-Achs Kinematik mit hoher Genauigkeit volumetrisch messen. Da der Aufwand für die Messungen mit diesem Aufbau sehr groß ist und sein Einsatz durch den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn motiviert war, sei an dieser Stelle zusätzlich auf den im vorherigen Kapitel genutzten Messaufbau aus der ISO 2303 (2007) verweisen. Er stellt einen einfachen Standard-Messaufbau zur Erfassung von Korrekturwerten dar und kann für Linearachsen den thermo-elastischen Fehler an einer Achsposition mit deutlich geringerem Aufwand bestimmen.

Die infolge der Achsbewegungen anfallenden Verlustleistungen in Motoren, KGTs (Muttern und Lager) sowie Führungselementen sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Für den vorliegenden Fall hat sich jedoch die alleinige Nutzung der Achsgeschwindigkeit als Eingangsgröße für die Abbildung des thermo-elastischen Fehlers der Achse bewährt.

Das Versuchsspektrum für die 3-Achs Kinematik umfasst jeweils einen Versuch zu jeder Achse. Dabei werden unterschiedliche Belastungshöhen (Vorschübe) genutzt, um ein mögliches nichtlineares Verhalten der Maschine zu identifizieren. Konkret werden in den Versuchen für die Einzelachsen jeweils Vorschübe von 5, 10, 15 und 30 m/min sowie die Abkühlung berücksichtigt.

Die für die 3-Achs-Kinematik erreichte Korrekturgüte ist in Abb. 9 illustriert. Es zeigt sich, dass die Korrektur der Linearachsen die resultierenden Verlagerungen im gesamten Arbeitsraum der untersuchten WZM um bis zu 71 % reduzieren kann. Der $MPE_{L,k=2}$, bestimmt nach dem Diagonaltest gem. ISO 230-6, kann bei der Werkzeugmaschine über alle Versuche von $24,5 \mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$ auf $12,1 \mu\text{m} \pm 2,8 \mu\text{m}$ reduziert werden.

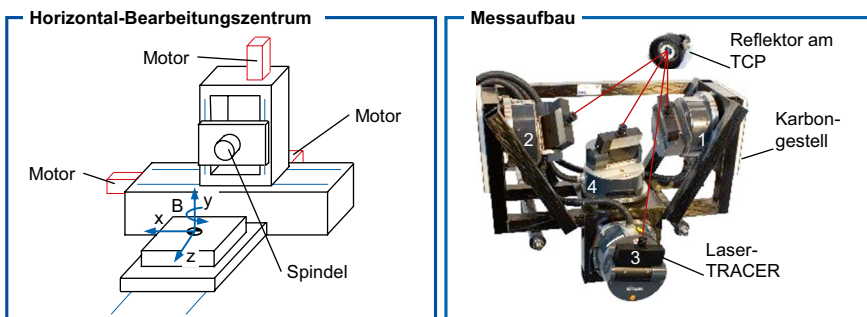


Abb. 8 Demonstratormaschine (links) (Wennemer 2018) Messaufbau mit vier Lasertracern (rechts) (Wennemer 2018)

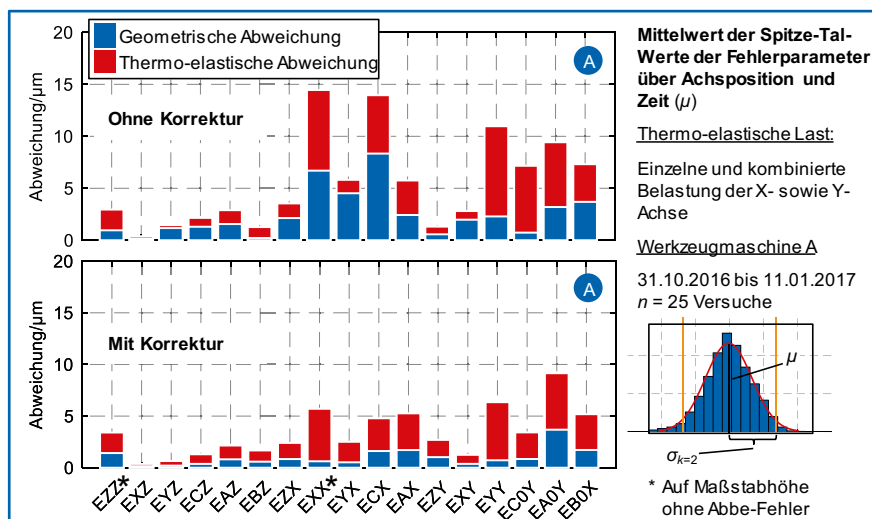


Abb. 9 Mittelwert der Spitze-Tal-Werte vor und nach der Korrektur (Wennemer 2018)

Zusätzlich kann eine Spindelkorrektur für die Maschine entwickelt werden. Das Kapitel [Effiziente Parametrierung von Korrekturmodellen](#) in diesem Buch fokussiert das Thema.

4 Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel fasst die Grundlagen der eigenschaftsmodellbasierten Korrektur für den Einsatz in der Praxis zusammen. Der Ansatz kann verwendet werden, um den thermo-elastischen Fehler einer Werkzeugmaschine zu reduzieren. Ein Vorteil des dargestellten Ansatzes ist die Anwenderfreundlichkeit und die Flexibilität. Die Korrektur kann mit jeglichen Messmitteln parametrierbar werden. So können hierfür auch simple Messmittel verwendet werden, die in der Regel in Firmen vorhanden sind. Ein Anwender kann aber auch durch das Heranziehen von komplexeren Messmitteln eine umfangreichere Korrektur mit der vorgestellten Methode ohne softwareseitigen Mehraufwand umsetzen. Ein Nachteil der hierdurch steigenden Komplexität kann jedoch eine gleichzeitig steigende Parametrierungszeit und steigende Kosten der Messmittel sein.

Literatur

- Brecher C, Weck M (2017) Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme: Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung, Springer Berlin, ISBN 978-3-662-46567-7
- Brecher C, Spierling R, Fey M (2018) A new calibration approach for a grey-box model for thermal error compensation of a C-Axis. In Conference on thermal issues in machine tools proceedings, ISBN 978-3-86780-586-5
- Grossmann K (2015) Thermo-energetic design of machine tools. Springer, Cham, ISBN 978-3-319-12624-1
- ISO 230, Test code for machine tools – Part 3 (2007) Determination of thermal effects. ISO copyright office, Genf. ICS 25.080.01
- Naumann C, Ihlenfeld S, Spierling R et al (2017) Experimentelle Analyse modellbasierter Korrekturverfahren für thermo-elastische Verformungen im online-Einsatz an einer Demonstratormaschine. In Christian Brecher (Hrsg) Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen. 5. Kolloquium zum SFB/TR 96, Dresden
- Schwenke H, Franke M, Hannaford J, Kunzmann H (2005) Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. CIRP Ann Manuf Technol 54(1):475–478. [10.1016/S0007-8506\(07\)60148-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60148-6)
- Wennemer M (2018) Methode zur messtechnischen Analyse und Charakterisierung volumetrischer thermo-elastischer Verlagerungen von Werkzeugmaschinen. Apprimus Verlag, Aachen. ISBN: 978-3-86359-592-0

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

